



HAL
open science

Outils numériques pour la reconstruction et l'analyse sémantique de représentations graphiques de bâtiments

Lucile Gimenez

► **To cite this version:**

Lucile Gimenez. Outils numériques pour la reconstruction et l'analyse sémantique de représentations graphiques de bâtiments. Traitement des images [eess.IV]. Université Paris VIII, 2015. Français. NNT : 2015PA080047 . tel-02273156

HAL Id: tel-02273156

<https://hal.science/tel-02273156>

Submitted on 28 Aug 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE
Pour obtenir le grade de
DOCTEUR de l'UNIVERSITÉ PARIS VIII
Spécialité : **Informatique**

Présentée par
Lucile GIMENEZ

**Outils numériques pour la
reconstruction et l'analyse sémantique
de représentations graphiques de
bâtiments**

Thèse dirigée par **Khaldoun ZREIK**
et encadrée par **Frédéric SUARD** et **Sylvain ROBERT**

préparée au sein du **Laboratoire d'Analyse des Données et
d'Intelligence des Systèmes du CEA, LIST**
et du **Laboratoire Paragraphe de l'Université Paris 8**
dans l'**École doctorale Cognition, Langage, Interaction**

Thèse soutenue publiquement le **10 décembre 2015**

devant le jury composé de :

Mme. Patrizia LAUDATI	Université de Valenciennes, Rapporteur
M. François GUÉNA	Ecole d'architecture de la ville de Paris, Rapporteur
M. Yacine REZGUI	Université de Cardiff, Examineur
M. Olivier TOURNAIRE	CSTB, Examineur
M. Khaldoun ZREIK	Université Paris 8, Directeur de thèse
M. Frédéric SUARD	CEA, Encadrant de thèse
M. Sylvain ROBERT	CEA, Encadrant de thèse

A Sekouba, mon petit frère.

Remerciements

Merci à Khaldoun d'avoir dirigé ma thèse, à tous les membres du jury pour l'intérêt porté à mon travail. A mes deux encadrants, Frédéric et Sylvain, pour leur présence et leurs caractères si différents et finalement complémentaires.

Et aussi un grand merci à tous les membres du laboratoire CiTu de Paris 8 et ceux du LADIS au CEA pour le quotidien partagé, les pauses et la bonne ambiance. A ceux qui ont partagé un temps leur bureau avec moi et surtout à Guillaume pendant cette dernière année. Merci à toutes les personnes qui ont été mes cobayes lors des tests utilisateurs. Une pensée aussi à Jana mon binôme de rédaction et de soutenance. Emira, merci pour ton soutien pendant ces trois années. A Patricia, pour ses précieux conseils.

Rares sont les amis mais si précieux. Un grand merci à vous qui êtes toujours présents pour passer de bons moments et pour votre soutien dans les mauvais. Merci à Marine, Pauline, Guigui, Crédo, Anthony, Lucie, Vincent, Amandine, Bertrand, Robin et tous les autres. A mes copines qui sont éparpillées à travers la France du Sud au Nord : Alix, Audrey, Jennifer, Myriam, Daphné, Julie et Manon.

Cela fait maintenant six années qu'ils me connaissent, merci aux Chomaz pour tout ce que vous faites pour nous. Merci à ma famille, à mes trois sœurs Julie, Élise et Noémie et mes parents pour m'avoir toujours soutenue. N'ayez pas de regret pour tout ce que l'on a vécu.

Il est celui qui partage ma vie et qui est présent à chaque instant. Sans lui, je ne serai pas là aujourd'hui à écrire ses remerciements. Merci à mon Pierre d'être toi avec moi.

Résumé

Afin de répondre aux nouvelles normes énergétiques, une des solutions est de rénover les bâtiments anciens pour diminuer leur consommation énergétique. Grâce à l'émergence de nouveaux outils numériques tels que la maquette numérique d'un bâtiment ou BIM (*Building Information Modeling*), des simulations énergétiques peuvent être réalisées. Cependant, pour la plupart des bâtiments, aucune information numérique n'est disponible. Un des enjeux actuels dans le domaine de la rénovation est donc de générer des maquettes numériques de bâtiments existants en un temps et pour un coût raisonnables.

Un grand nombre de méthodes existent pour reconstruire automatiquement des modèles 3D à partir de diverses sources de données : laser scanner, photogrammétrie, etc. La revue d'état de l'art menée dans le cadre de notre travail montre qu'aucune méthode actuelle n'est à privilégier par rapport à une autre. Tout dépend des spécificités du projet et du niveau de détails attendu pour l'utilisation future de la maquette.

L'objectif de nos travaux est de développer une méthodologie pour générer des maquettes numériques de bâtiments à faible coût en limitant l'acquisition de données. Notre choix s'est porté sur l'utilisation de plans papiers 2D scannés. Nous faisons l'hypothèse qu'un tel plan est presque toujours disponible pour un bâtiment même si celui-ci n'est pas toujours mis à jour et que sa qualité influe sur celle de la reconstruction. Un tel choix est un bon compromis entre coût et qualité de la reconstruction.

La reconstruction automatique d'un BIM à partir d'une image est fondée sur la recherche et l'identification de trois composantes : la géométrie (forme des éléments), la topologie (liens entre les éléments) et la sémantique (caractéristiques des éléments). Lors de cette phase, des ambiguïtés peuvent apparaître qui ne sont pas traitées automatiquement. Cela s'explique en partie par la diversité existante de représentations et de symboles utilisés pour dessiner les plans qui ne permet pas de concevoir un outil traitant automatiquement tous les types de plans. C'est pourquoi, nous proposons un processus basé sur des interventions ponctuelles et guidées de l'utilisateur afin d'identifier automatiquement les erreurs et proposer des choix de correction pour éviter leur propagation.

Ce document décrit la méthodologie mise en place pour proposer une reconstruction semi-automatique et propose une analyse des résultats obtenus sur une base de données de 90 plans. Est également présentée la suite de ces travaux qui a porté sur une généralisation du processus afin d'en tester la robustesse, le passage à l'échelle et la gestion multi-niveaux. Ces résultats mettent en évidence la pertinence de la classification des erreurs, de leur identification et des propositions faites à l'utilisateur. Le processus développé est également flexible pour faciliter un ajout futur d'autres sources de données de manière à enrichir la maquette numérique comme des résultats de segmentation d'images de façade.

Abstract

In Europe, a large number of buildings have to undergo major renovation in order to comply with current regulations and environmental challenges. The BIM (*Building Information Modeling*), as well as the related software support (e.g. energy simulation tools) dramatically help the designers to make better-informed decisions, and result in more optimal energy-efficient designs. Such advanced design approaches require 3D digital models in order to realize their full potential. However, such models are not available for existing buildings. A research challenge, in the scope of renovation, is to devise effective and reliable methods and tools to reconstruct 3D digital models of existing buildings.

Many approaches already exist (e.g. laser scanning, photogrammetry) but the related costs hinder their wider take-up. The difficulty of creating 3D models at reasonable costs is actually the main factor that still prevents the intensive use of BIM in renovation. The selection of a method will highly depend on the end users objectives and constraints.

The aim of our work is to develop a method to generate 3D building models from existing buildings at low cost and in a reasonable time. We have chosen to work with 2D scanned plans. We assume that it is possible to find a paper plan for most buildings even if it is not always up-to-date and if the recognition quality is also dependent to the plan quality. This choice is a good compromise between time and quality reconstruction.

The automatic reconstruction of a BIM from a paper plan is based on the extraction and identification of three main components : geometry (element shape), topology (links between elements) and semantics (object properties). During this process, some errors are generated which cannot be automatically corrected. Indeed, many graphic representations exist for architecture symbols and tackling the diversity of representations in architectural plans remains a research challenge. This is why, we propose a novel approach based on punctual and guided human interventions to automatically identify and propose correction choices to the user in order to avoid error propagation.

This document describes the methodology we have defined to convert semi-automatically a 2D scanned plan into a BIM. It also gives an account of an assessment that we have lead based on a floor plan database containing 90 images. We also summarize our subsequent work, which has been focused on the process genericity to test its robustness, the challenge of moving to scale and the multi-level management. The results highlight the pertinence of our approach of error classification and identification and confirm that structured and assisted interactions with the user lead to better performances. The process is flexible in order to be completed later by others data sources such as façade image segmentation to enrich the model.

Table des matières

Remerciements	5
Résumé	i
Abstract	iii
Acronymes	ix
Liste des symboles	xi
Introduction générale	1
1 Contexte et problématique	5
1.1 La maquette numérique ou Building Information Modeling (BIM)	6
1.1.1 BIM et rénovation	6
1.1.2 Les formats du BIM	11
1.2 La numérisation d'un bâtiment existant	12
1.2.1 Méthodes basées sur des acquisitions de données sur site	13
1.2.2 Méthodes basées sur des documents existants	17
1.2.3 Comparaison des méthodes existantes	20
1.3 L'analyse de plans architecturaux	23
1.3.1 Processus général	23
1.3.2 Extraction et reconnaissance des éléments du plan	24
1.3.3 Validation et correction	26
1.4 Discussion et conclusion sur l'orientation des travaux	29
1.4.1 Limites actuelles	29
1.4.2 Orientation des travaux	31
2 Génération automatique d'une maquette numérique 3D à partir d'un plan 2D scanné	35
2.1 Introduction	36
2.2 Extraction des éléments caractéristiques du plan	37
2.2.1 Prétraitements	37
2.2.2 Extraction du texte	38

2.2.3	Extraction d'éléments graphiques	40
2.3	Reconstitution des éléments du bâtiment	42
2.3.1	Identification des murs	42
2.3.2	Ouvrants	46
2.4	Reconstruction de la maquette numérique	47
2.4.1	Forme extérieure du bâtiment	48
2.4.2	Reconstruction intérieure	49
2.4.3	Recherche d'espaces	51
2.5	Export 3D	53
2.5.1	Caractéristiques du modèle de données interne	54
2.5.2	Le modèle IfcLight	55
2.6	Évaluation de performance	59
2.6.1	Développement d'un prototype	59
2.6.2	Présentation des données tests	59
2.6.3	Méthodes d'évaluation	61
2.6.4	Résultats	65
2.7	Conclusion - Discussion	68
3	Génération semi-automatique : interactions humaines	71
3.1	Objectifs et problématique	72
3.2	Taxonomie et hiérarchisation des erreurs	74
3.2.1	Analyse des résultats du traitement automatique	74
3.2.2	Création d'une taxonomie	76
3.2.3	Classification des erreurs	78
3.3	Détection et enregistrement des erreurs	80
3.3.1	Méthodologie de détection	80
3.3.2	Extension de l'IfcLight	83
3.4	Corrections par les utilisateurs	85
3.4.1	Processus général	85
3.4.2	Corrections et actions des utilisateurs	88
3.5	Résultats de l'évaluation de performance	93
3.5.1	Exemples de reconstruction semi-automatique	93
3.5.2	Évaluation au niveau des pixels	96
3.5.3	Évaluation du bâtiment	99
3.5.4	Analyse des interventions utilisateurs	100
3.6	Conclusion - Discussion	104
4	Généralisation de l'outil	107
4.1	Objectifs et problématique	108
4.2	Généralisation des plans	109
4.2.1	Adaptation à diverses représentations	109

4.2.2	Passage à l'échelle	114
4.2.3	Extension à la construction multi-niveaux	119
4.2.4	Applications et performances sur d'autres représentations	121
4.3	Diversité des utilisateurs	129
4.3.1	Déroulement de la phase de tests	129
4.3.2	Résultats des tests utilisateurs	131
4.4	Conclusion - Discussion	136
4.4.1	Validation de la robustesse et généralisation	136
4.4.2	Validation du procédé de reconstruction assistée	137
Conclusion		141
A.	Résumé des travaux	142
B.	Limites du processus développé	144
C.	Perspectives	145
Bibliographie		149
Valorisations liées aux travaux		159

Acronymes

BIM	Building Information Modeling
CAD	Computer-aided design
CEA	Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives
CSTB	Centre Supérieur et Technique du Bâtiment
IFC	Industry Foundations Classes
IGN	Institut National de l'Information Géographique et Forestière
IHM	Interface Homme Machine
JI	Jaccard Index
LIDAR	Light Detection And Ranging
LoD	Level of Details
MNT	Modèle Numérique de Terrain
OCR	Reconnaissance Optique de Caractères
QCM	Question à choix multiples
SIG	Systèmes d'Information Géographique

Liste des symboles

A_{min}	Aire minimale
B	Élément du bâtiment
B_o	Ouvrant (porte ou fenêtre)
B_w	Mur
e	Primitive géométrique
E	Erreur
E_I	Élément intérieur
E_{max}	Épaisseur maximale
E_{min}	Épaisseur minimale
F_B	Forme extérieure du bâtiment
I_b	Image binarisée
L_{max}	Longueur maximale
L_{min}	Longueur minimale
P	Point
P_t	Point topologique
ρ	Distance du segment au centre (paramètre de Hough)
S	Espace ou pièce
t	Élément texte
θ	Angle orienté du segment (paramètre de Hough)
v	Valeur d'un pixel

Introduction générale

Contexte et problématique

En décembre 2015, la France accueillera la 21^{ème} Conférence des Nations unies sur les changements climatiques. Afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre, améliorer l'efficacité énergétique des bâtiments est l'une des pistes envisagées. Pour cela, la construction de bâtiments neufs à basse consommation mais surtout la rénovation des bâtiments anciens sont des enjeux majeurs afin de réduire les besoins énergétiques des ménages. Un des objectifs de la France, inscrit dans la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (TECV), promulguée au Journal Officiel le 18 août 2015, est de passer de 150.000 à 500.000 rénovations thermiques de logements par an pour que les bâtiments réduisent leur consommation énergétique.

L'émergence des Technologies de l'Information et de la Communication (TIC), notamment dans le domaine de la construction, donne maintenant accès à un grand nombre de solutions logicielles pour concevoir et gérer un bâtiment. Dans le domaine plus spécifique de la rénovation, des outils logiciels permettent de réaliser des simulations thermiques à l'aide d'une modélisation 3D du bâtiment. Dans le domaine de la construction, de plus en plus de bâtiments neufs sont conçus directement dans un format numérique 3D. Cependant, ces approches peuvent difficilement être mises en œuvre sur les bâtiments anciens, car on dispose de peu d'information numérique et ils sont les plus concernés par la rénovation. On ne peut améliorer l'efficacité énergétique du parc immobilier sans significativement optimiser les approches de conception en rénovation, en particulier au travers des outils numériques.

Dès 1974 un rapport de recherche dirigé par Charles Eastman introduit le concept d'un système informatique de description de bâtiment. L'idée est d'utiliser un modèle de données spécifique au bâtiment afin de partager les informations entre tous les acteurs impliqués par le cycle de vie d'un bâtiment [1]. Depuis, ce concept a évolué et s'intitule désormais *Building Information Modeling* (BIM). C'est à la fois un modèle de données du bâtiment ainsi qu'un processus de travail et de collaboration. Ses principales caractéristiques sont de permettre le stockage des informations du bâtiment en évitant la redondance des supports, le partage entre tous les participants d'un même projet ainsi que l'échange grâce à l'interopérabilité entre logiciels avec l'utilisation d'un format commun [2].

La maquette numérique d'un bâtiment l'accompagne durant tout son cycle de vie : depuis les premières esquisses réalisées en phase de conception jusqu'à son éventuelle démolition. Elle contient toutes les informations nécessaires lors des différentes étapes de sa vie et a pour vocation d'être utilisée par tous les acteurs liés au bâtiment. Elle est mise à jour au fur et à mesure des changements et chaque acteur peut directement y avoir accès.

Par exemple, si des travaux de rénovation doivent être réalisés, la même maquette pourra être utilisée par un thermicien pour réaliser des simulations énergétiques afin d'établir un bilan de la consommation du bâtiment et par l'architecte pour planifier des travaux de rénovation et mettre à jour la maquette.

Bien que la maquette numérique de bâtiment soit de plus en plus utilisée pour la construction de bâtiments neufs, cela n'est pas le cas pour des projets de rénovation de bâtiments anciens. Or, la rénovation de ces bâtiments est un des enjeux actuels afin de répondre aux nouvelles normes énergétiques. En effet, peu d'informations numériques sont disponibles sur les anciens bâtiments et il faut par conséquent créer la maquette numérique grâce aux informations existantes ou directement à partir d'acquisition de données sur site.

C'est pourquoi, un des enjeux actuels dans le domaine de la rénovation est de pouvoir générer une maquette numérique d'un bâtiment existant. L'objectif de cette thèse est donc de proposer une méthodologie de reconstruction de maquettes numériques 3D (BIM) de bâtiments existants respectant les conditions suivantes. Elles devront être réalisées à faible coût en limitant notamment l'acquisition de données sur site, l'achat de matériel et dans un temps minimum. Elles devront être compatibles avec des formats standards du BIM pour une utilisation dans des logiciels existants de simulation énergétique par exemple. L'approche développée doit permettre de modéliser un ensemble varié de bâtiments en un temps et un coût raisonnables. Le processus est abordé ici dans sa globalité : depuis l'extraction d'information jusqu'à la génération de la maquette 3D.

La solution proposée est de coupler l'étude de plans papiers 2D scannés avec un processus interactif pour reconstruire la maquette numérique. La définition de cette solution a nécessité d'aborder plusieurs domaines de recherche tels que le traitement d'image, la reconnaissance de forme, le génie logiciel ou encore la modélisation numérique de bâtiment. Un des défis a été de définir le meilleur compromis technologique entre ces différents éléments, permettant d'aboutir à une preuve de concept opérationnelle en fin de thèse.

Un domaine de recherche abordé concerne l'analyse de documents numériques par l'extraction d'information et la reconnaissance d'éléments spécifiques dans une image. Le principal enjeu est d'extraire l'information nécessaire permettant d'identifier les éléments utiles pour reconstruire une maquette numérique respectant les normes définies par le BIM. En effet, le domaine du BIM et du génie logiciel est également concerné car les maquettes numériques sont exportées dans un format standard afin d'être utilisées dans des solutions logicielles disponibles sur le marché. Un autre enjeu est de faire le lien entre les informations extraites de l'image et l'utilisateur pour le guider lors de la phase de correction de la maquette numérique.

Plan du manuscrit

L'étude bibliographique présentée dans le chapitre 1 a permis d'une part d'analyser l'utilisation actuelle du BIM et son utilité potentielle dans des projets de rénovation. D'autre part, elle recense un grand nombre de méthodes et de techniques existantes pour reconstruire automatiquement un BIM à partir de diverses sources de données : laser scanner, photogrammétrie, documents existants, etc. Il en ressort principalement qu'aucune méthode n'est à privilégier en particulier. Tout dépend des spécificités du projet et sur-

tout du niveau de détails nécessaire pour l'utilisation future de la maquette numérique. En effet, aucune méthode existante n'est actuellement performante à 100% en automatique.

Notre choix s'est porté sur l'utilisation de plans 2D papiers préalablement scannés. Ces documents sont ceux étant les plus disponibles pour des bâtiments anciens et il n'est ainsi pas nécessaire de réaliser d'acquisition de nouvelles données sur site. Cependant, un plan papier n'est pas toujours à jour et la qualité de ce dernier influe sur la qualité de la reconstruction.

Le chapitre 2 détaille la méthodologie mise en place pour la génération automatique d'une maquette numérique à partir d'une image de plan. Elle se base principalement sur l'extraction et l'identification dans l'image des éléments du bâtiment selon les trois composantes suivantes : la géométrie qui définit la forme des objets, la topologie qui permet d'identifier les liens entre chaque objet et enfin la sémantique qui décrit précisément les caractéristiques des objets.

Les objets reconnus dans le plan sont principalement les murs, les portes, les fenêtres et les pièces. D'autres éléments sont représentés dans le plan comme le mobilier ou encore les escaliers mais leur reconnaissance n'est pas abordée dans ces travaux. Le processus mis en place présente l'avantage de traiter toutes les étapes de la conversion : du traitement de l'image brute à l'export de la maquette dans un format compatible avec le BIM. Des tests pour évaluer les performances ont également été effectués grâce à une base de données de 90 plans de maisons individuelles et ont permis la validation de la méthodologie.

L'analyse des tests, réalisés lors de la conversion automatique du plan papier scanné en BIM, ont mis en évidence la présence d'erreurs et d'incohérences dans les maquettes générées qui ne peuvent pas être corrigées de façon générique en raison d'un manque d'information ou de difficultés d'interprétation des informations présentes sur le plan. Le chapitre 3 présente les travaux réalisés pour lever ce verrou en proposant d'intégrer lors de la phase de reconnaissance automatique des interventions humaines ponctuelles et guidées.

Nous avons réalisé pour cela un travail théorique d'identification des erreurs et de classification suivant un ensemble de critères liés au domaine d'exploitation envisagé : dans notre cas la rénovation énergétique. Ce classement a permis de mettre en évidence les erreurs à corriger en priorité afin d'éviter leur propagation et générer une maquette numérique cohérente. Une méthodologie de correction et de propositions apportées à l'utilisateur a alors été mise en place basée sur cette étude préliminaire.

Des tests de performance ont également été réalisés en utilisant la même base de plans que dans le chapitre précédent. Les résultats sont concluants car cette méthodologie originale permet d'améliorer considérablement, en un temps raisonnable, la qualité des maquettes numériques générées.

Le chapitre 4 est focalisé sur la généralisation des méthodes développées afin de valider la robustesse du procédé sur divers plans de représentations graphiques différentes. Les méthodes précédentes ont alors été étendues sans modifier le processus général mis en place. Ainsi, des plans de qualité moindre que ceux de la base de test ainsi que des plans de bâtiments de grande taille et comportant plusieurs étages ont pu être traités. Ces tests ont également permis de valider la capacité de passage à l'échelle ainsi que la gestion multi-niveaux d'un bâtiment.

La robustesse de l'outil face à différents utilisateurs a été évaluée grâce à des tests réalisés sur un ensemble de personnes de divers profils : architecte, informaticien, etc. Ils ont permis de valider la pertinence du procédé semi-automatique mis en place dans le choix des questions posées et des corrections proposées à l'utilisateur.

Finalement, l'extension des approches développées dans les travaux présentés est abordée par le biais de propositions d'améliorations et de développement d'outils complémentaires ainsi que par la proposition d'intégration de nouvelles sources de données.

Apports scientifiques des travaux

Les travaux de recherche exposés ici permettent d'apporter trois principales contributions décrites ci-dessous :

1. Proposition d'une solution complète de génération d'une maquette numérique pour un bâtiment existant se basant sur l'extraction et l'identification des éléments du bâtiment selon les trois composantes suivantes : géométrie, topologie et sémantique.
2. Mise en place de méthodes de reconstruction d'un bâtiment à partir d'informations extraites d'une image grâce à une reconnaissance de formes et à des méthodes de traitement d'images.
3. Développement d'un procédé assisté de reconstruction dans lequel des corrections sont proposées à l'utilisateur en fonction de l'erreur relevée et de la configuration du plan.

Par rapport à l'état de l'art, la solution proposée est complète et traite l'ensemble des étapes pour reconstruire une maquette numérique d'un bâtiment existant. Toutes les phases depuis l'analyse de l'image à l'export 3D de la maquette numérique dans un format compatible avec le BIM sont traitées. De plus, cette solution présente l'avantage d'être peu coûteuse financièrement car elle ne nécessite pas d'acquisition lourde de données. Par rapport à une reconstruction entièrement manuelle d'une maquette numérique, le gain de temps est également considérable.

Une méthodologie de reconstruction d'un bâtiment à partir des informations 2D extraites d'une image d'un plan a également été développée, basée sur une approche hiérarchique. Elle part de l'élément le plus fin dans l'image (le pixel), pour identifier les éléments caractéristiques du plan (murs et ouvrants) qui sont ensuite assemblés grâce à diverses règles pour obtenir une maquette numérique cohérente.

Le procédé assisté de reconstruction constitue également un apport scientifique. En effet, les méthodes développées permettent d'extraire lors du processus de conversion de l'image en maquette numérique les erreurs et de générer automatiquement des propositions de correction, afin que l'utilisateur n'ait plus qu'à sélectionner la plus appropriée. Ce processus ne fait intervenir l'utilisateur que ponctuellement tout en guidant ses réponses. Grâce à ce procédé, un gain de temps est réalisé par rapport à une reconstruction entièrement manuelle et les maquettes numériques obtenues sont complètes et cohérentes.

Chapitre 1

Contexte et problématique

Sommaire

1.1	La maquette numérique ou Building Information Modeling (BIM)	6
1.1.1	BIM et rénovation	6
1.1.1.1	Enjeux	6
1.1.1.2	Adoption du BIM	9
1.1.2	Les formats du BIM	11
1.2	La numérisation d'un bâtiment existant	12
1.2.1	Méthodes basées sur des acquisitions de données sur site	13
1.2.1.1	Relevé manuel	13
1.2.1.2	Photogrammétrie	14
1.2.1.3	Nuages de points 3D	16
1.2.2	Méthodes basées sur des documents existants	17
1.2.2.1	Esquisses	18
1.2.2.2	Plans au format CAD	19
1.2.2.3	Plans 2D scannés	19
1.2.3	Comparaison des méthodes existantes	20
1.3	L'analyse de plans architecturaux	23
1.3.1	Processus général	23
1.3.2	Extraction et reconnaissance des éléments du plan	24
1.3.2.1	Extraction des primitives géométriques	25
1.3.2.2	Reconnaissance des éléments du bâtiment	25
1.3.3	Validation et correction	26
1.3.3.1	Aperçu général du processus de vérification et de validation	26
1.3.3.2	Vérification générale de la maquette numérique	27
1.3.3.3	Validation selon un scénario spécifique	28
1.4	Discussion et conclusion sur l'orientation des travaux	29
1.4.1	Limites actuelles	29
1.4.1.1	L'absence de solution complète pour la conversion	29
1.4.1.2	Le manque d'information sur le plan architectural	30
1.4.2	Orientation des travaux	31
1.4.2.1	Utiliser des sources de données complémentaires	32

1.4.2.2	Intégrer les utilisateurs	32
1.4.2.3	Choisir un format de données adapté	33

1.1 La maquette numérique ou Building Information Modeling (BIM)

La maquette numérique (BIM) est depuis quelques années un véritable outil de conception et de suivi d'un bâtiment. Elle est définie pour l'accompagner durant tout son cycle de vie : depuis les premières esquisses réalisées en phase de conception à sa démolition. Nous nous intéressons plus particulièrement dans ces travaux à la phase de rénovation d'un bâtiment. Dans cette partie, les enjeux liés à la rénovation et la nécessité d'utiliser le BIM pour tous les acteurs d'un projet sont présentés ainsi qu'un aperçu des formats de données existant actuellement pour travailler avec des maquettes numériques.

1.1.1 BIM et rénovation

1.1.1.1 Enjeux

Le parc immobilier européen est en grande partie composé de bâtiments anciens construits avant 1960, et seulement 19% ont moins de 25 ans (cf. figure 1.1). En France, 1% de nouveaux bâtiments sont édifiés chaque année d'où un renouvellement lent du parc immobilier [3].

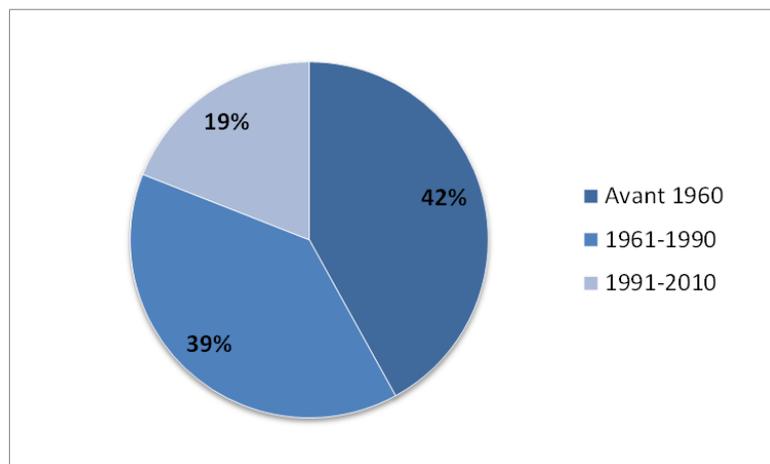


FIGURE 1.1 – Répartition des bâtiments d'Europe du Nord et de l'Ouest en fonction de leur année de construction [3].

En 2011, des travaux d'entretien ont été réalisés dans 7.7 millions de logements résidentiels soit 23% du parc français. Parmi ces travaux, 35% ont été menés dans un contexte de rénovation énergétique : rénovation de la façade, du toit, de l'installation de chauffage ou encore la pose de portes et fenêtres extérieures isolantes, représentant un budget total de 38 milliards d'euros d'investissement [4]. Ces travaux ont été particulièrement favorisés par les aides incitatives apportées par l'État dans le cadre de travaux de rénovation

comme des réductions d'impôts.

Tous les pays doivent de plus en plus faire face à de nouveaux défis afin de réduire leur consommation énergétique en prenant des mesures adéquates. La figure 1.2 représente la répartition énergétique sur tous les secteurs confondus en Europe, la consommation énergétique des bâtiments comprend la consommation des ménages et des activités de service soit 40%. Elle arrive en deuxième position derrière le secteur des transports en terme d'énergie consommée. Suivant les pays, l'énergie utilisée par les bâtiments représente entre 20% et 40% de l'énergie totale. Améliorer les performances énergétiques des bâtiments semble donc être un des leviers essentiels pour diminuer la consommation globale [5].

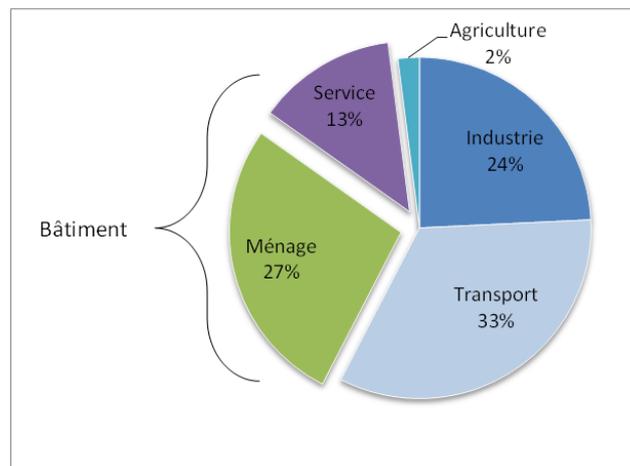


FIGURE 1.2 – Répartition de la consommation énergétique par secteur d'activité en 2009 en Europe [3]. La consommation énergétique des bâtiments est composée de la consommation énergétique des ménages et du secteur des services.

La combinaison de ces différents facteurs amène à la conclusion qu'une amélioration des pratiques de rénovation de bâtiments pourrait aider à relever en partie les défis énergétiques actuels. Des travaux de recherche ont déjà démontré que des systèmes d'aide à la décision pour la sélection et le déroulement des actions de rénovation sur des bâtiments pouvaient amener des bénéfices importants en terme de coût et d'efficacité énergétique [6]. Ces méthodes se basent sur la recherche de solutions optimisant les propositions de rénovation suivant certains critères sur différents éléments du bâtiment.

En France, la nouvelle loi sur la transition énergétique pour la croissance verte¹ prévoit un ensemble de mesures législatives pour les particuliers, les collectivités ou les entreprises pour favoriser la rénovation des bâtiments afin de diminuer l'énergie consommée. L'objectif annoncé est de diminuer de moitié la consommation énergétique d'ici à 2050 en prévoyant la rénovation de 500.000 logements par an au lieu de 150.000 actuellement.

Au-delà de ce contexte politique, social et réglementaire qui se traduit par une plus grande exigence de résultats en rénovation, le socle technologique évolue également de façon importante. En particulier, la maquette numérique et les outils logiciels associés ont engendré une forte évolution des pratiques. Les grandes catégories de logiciels désormais

1. <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Renover-les-batiments-pour.html>

capables d'utiliser une maquette numérique en l'important ou l'exportant dans des formats compatibles avec le BIM sont :

- Les logiciels de dessin architectural.
- Les logiciels de simulation thermique, acoustique ou autres.
- Les logiciels de suivi de chantier.
- Les logiciels de diagnostic énergétique.

Ces logiciels permettent, entre autres, de réaliser divers calculs afin de simuler le comportement du bâtiment pour comparer plusieurs scénarios de rénovation comme par exemple EnergyPlus² ou le logiciel ELODIE, développé par le Centre Supérieur et Technique du Bâtiment³ (CSTB), qui est un logiciel de performance globale des bâtiments. L'utilisation de ces logiciels au cours des différentes étapes d'un projet de rénovation est un réel avantage car ils permettent de centraliser l'information et d'optimiser les travaux réalisés. Une même maquette numérique est alors utilisée par l'architecte dans un logiciel de dessin architectural puis par un thermicien dans un logiciel de diagnostic énergétique.

Cependant, les logiciels dédiés aux simulations énergétiques (BPS pour Building Performance Simulation) sont le plus souvent non compatibles avec d'autres outils BIM car leurs formats de données (interne ou externe) sont différents. Plus précisément, le BIM s'appuie sur une maquette numérique composée d'objets reliés par des relations géométriques, topologiques et sémantiques. De plus, chaque objet possède ses propres caractéristiques.

Dans le cas des logiciels de calcul de performance énergétique, la maquette numérique utilisée contient principalement une définition des zones thermiques et des propriétés des matériaux [7]. C'est pourquoi des problèmes d'interopérabilité persistent, alors même que de nombreux travaux portent sur une intégration plus forte du BIM dans les logiciels de simulation énergétique [8].

La maquette numérique est de plus en plus utilisée dans les projets de nouvelles constructions mais elle reste encore peu exploitée dans les travaux de rénovation. La principale raison réside dans le fait que pour la plupart des bâtiments, on ne dispose pas d'information numérique les concernant. Il n'est de plus pas toujours rentable de générer un modèle 3D car les informations nécessaires à l'utilisation de la maquette numérique diffèrent en fonction de l'application.

Une des solutions serait de créer manuellement la maquette numérique de chaque bâtiment, mais cela est une tâche trop coûteuse en temps. Le fait que la maquette numérique soit de nos jours encore peu utilisée dans des projets de rénovation est aussi lié au temps d'apprentissage du BIM et aux changements de pratiques qui doivent se produire chez les professionnels. C'est pourquoi, il devient important de trouver des outils et méthodes pour reconstruire en un temps et un coût raisonnable la maquette numérique d'un bâtiment existant.

2. <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>

3. <http://logiciels.cstb.fr/default>

1.1.1.2 Adoption du BIM

Différentes études ont été réalisées au cours des dernières années pour analyser l'adoption du BIM suivant les pays. Le graphique de la figure 1.3 est extrait d'un rapport de Mc Graw Hill Construction sur l'utilisation du BIM par les entrepreneurs à travers le monde en 2013 [9]. Sur le graphique, la part d'entrepreneurs utilisant le BIM dans au moins 30% de leurs projets est représentée pour l'année 2013 avec une projection pour l'année 2015. On note que les États-Unis restent le pays où le BIM est le plus utilisé mais que de plus en plus de pays vont l'adopter de façon presque équivalente notamment la France, l'Australie, l'Allemagne et le Brésil qui devrait enregistrer la plus forte progression en deux ans.

En 2013, le Brésil est un des pays comportant le plus d'entrepreneurs utilisant déjà le BIM a un niveau modéré, c'est à dire dans 15 à 29% de leurs projets. Dans la projection réalisée pour l'année 2015, il est prévu que cet ensemble d'entrepreneurs utilise davantage le BIM dans leurs projets, d'où cette forte augmentation.

Au Royaume-Uni, le gouvernement souhaite exiger l'utilisation du BIM dans tous projets publics de construction en 2016, ce qui forcera les utilisateurs à utiliser plus fréquemment le BIM dans leurs projets [10]. Ce graphique illustre la volonté actuelle d'intégrer de plus en plus le BIM dans les projets de construction.

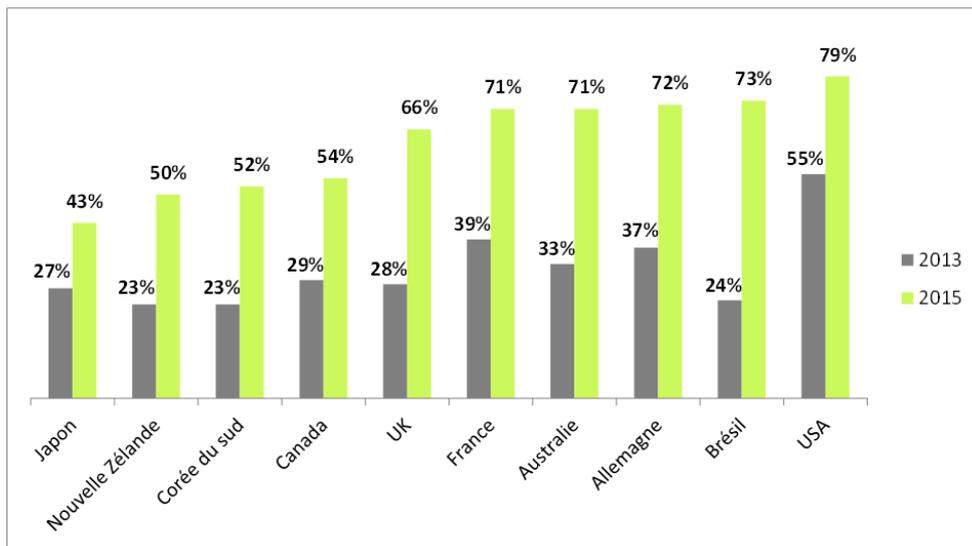


FIGURE 1.3 – Évolution attendue entre 2013 et 2015 du pourcentage d'entrepreneurs utilisant le BIM dans plus de 30% de leurs projets [9].

Dans d'autres pays, non représentés sur le graphique, le BIM est également de plus en plus adopté pour diverses raisons. En Chine, par exemple, l'attrait pour les nouvelles technologies favorisent l'adoption du BIM par les entreprises chinoises. Dans certains pays, les gouvernements souhaitent rendre l'utilisation du BIM obligatoire afin de réduire les coûts de production. Depuis 2010, en Norvège, tout projet mené par la société en charge du patrimoine immobilier de l'État doit obligatoirement impliquer le BIM. A Singapour, le BCA (Building and Construction Authority) estime que l'utilisation du BIM sur tous les chantiers devrait entraîner un gain de productivité de 25% d'ici à 2025 [10].

Le BIM est donc de plus en plus utilisé dans les projets de conception de nouvelles

constructions et d'optimisation de bâtiment. Cependant, pour une entreprise, le passage au BIM nécessite des investissements financiers qui expliquent en partie sa lente adoption : achat de nouvelles licences de logiciels, formation des employés et une modification des pratiques de travail. Une phrase prononcée par un professionnel⁴ reflète le changement apporté dans les méthodes de travail par l'utilisation d'un logiciel BIM par rapport aux logiciels traditionnels de conceptions de plans. "Un logiciel BIM c'est un logiciel de construction, on ne dessine rien, on construit virtuellement". Ainsi, la démarche adoptée est différente dans la création d'un bâtiment grâce à des outils BIM car la conception s'effectue directement en 3 dimensions.

De plus, le BIM nécessite des échanges fréquents et une coordination entre les membres d'une même entreprise mais aussi avec des équipes extérieures pour travailler sur une même maquette numérique à travers des logiciels et des besoins différents comme par exemple un architecte et un thermicien.

Ces facteurs font que le BIM n'est pas encore totalement adopté dans les entreprises mais que la démarche est lancée. Bien que du temps soit nécessaire pour s'approprier les nouveaux outils et appréhender de nouvelles méthodes, la plupart des sondages réalisés dans le domaine de la conception montrent l'attrait du BIM et ses nombreux avantages par rapport aux outils CAD [11, 12]. Cela laisse présager une utilisation de plus en plus importante dans les projets.

Une des principales différences entre le BIM et les outils CAD est que la maquette numérique est un support unique et commun à l'ensemble des partenaires d'un projet. Une modification sur un élément modifie automatiquement les autres objets impactés. Dans le format CAD, des vues indépendantes sont utilisées par les différents acteurs du bâtiment comme le plan des murs ou du réseau électrique. Lorsqu'une vue est modifiée, il faut alors modifier toutes les vues impactées par ce changement ce qui est le plus souvent source d'erreurs et coûteux en temps. Une autre différence entre le BIM et le CAD réside dans la définition même des objets. Dans le cas du CAD, les objets sont seulement définis par des formes géométriques (lignes, arcs) alors qu'un élément BIM est un objet pour lequel on décrit avec précision ses trois composantes : géométrie, topologie et sémantique [13].

Un autre changement majeur accompagne l'utilisation du BIM dans une entreprise par l'introduction d'un nouveau métier du bâtiment : le BIM manager [14]. Il gère à la fois les données mais aussi les conflits pouvant apparaître entre chaque partenaire du projet. Son rôle doit donc être bien défini dès le début du projet afin d'éviter des conflits d'intérêts ou une prise de pouvoir par une seule équipe. Le cadre légal lié à la réalisation de projet en mode BIM est aussi un point important et peut devenir un frein à l'utilisation du BIM. En effet, le BIM permet la collaboration entre différents acteurs mais des questions peuvent se poser concernant le propriétaire et le garant des données. Afin d'éviter là aussi des conflits, certains pays comme les États-Unis ont élaboré des documents d'aide à la rédaction de contrats entre les partenaires d'un même projet [15].

Le tableau 1.1 récapitule les principaux avantages et inconvénients de l'adoption du BIM. Bien que le BIM soit de plus en plus adopté par les entreprises, des problèmes d'interopérabilité entre logiciels sont toujours présents. Ils devraient pouvoir être en partie résolus par l'utilisation d'un même format de données standard. Cependant, une adoption

4. Propos recueillis lors de rencontres avec des professionnels du BIM en janvier 2015.

complète du BIM demande un effort supplémentaire aux entreprises aux collectivités car cela nécessite une évolution importante des méthodes de travail. De plus, il n'existe actuellement quasiment aucun texte juridique réglementant la propriété et la gestion des maquettes numériques.

TABLE 1.1 – Récapitulatif des avantages et inconvénients du BIM

Avantages	Inconvénients
✓ Partage de l'information	x Utilisation encore limitée
✓ Meilleur contrôle des données	x Investissements pour l'entreprise
✓ Richesse d'information	x Interopérabilité entre logiciels
✓ Pérennité du support	x Propriété et cadre juridique

1.1.2 Les formats du BIM

De plus en plus d'outils informatiques permettent la création et la gestion des maquettes numériques. MediaConstruct⁵, composante française de l'association BuildingSMART⁶ est en charge des normes relatives à la maquette numérique. Ils identifient trois principaux éditeurs mondiaux d'outils pour le BIM : Autodesk⁷, Nemetschek⁸ et Bentley⁹. Ces trois entreprises proposent des solutions complètes concernant la création et la gestion du BIM. Il existe aussi un ensemble de petites entreprises spécialisées dans la création de logiciels techniques (logiciels de simulation thermique ou de gestion du patrimoine).

Le prix d'une licence d'un logiciel BIM est quasiment équivalent au prix d'une licence CAD. En terme de coût, l'usage ne représente pas de différence, mais les utilisateurs doivent le plus souvent suivre des formations spécifiques pour apprendre à utiliser correctement ces logiciels qui diffèrent dans leur approche et ergonomie. Selon une étude réalisée sur une trentaine de projets utilisant le BIM, les principales difficultés concernant l'utilisation de logiciels BIM sont le fait de pouvoir gérer un grand nombre de données, le manque d'expérience pratique des utilisateurs et des échanges de données entre logiciels qui ne sont pas tout le temps réalisables et qui peuvent entraîner des pertes de données [16].

BuildingSmart a également pour mission de favoriser l'interopérabilité et d'œuvrer pour la création d'un standard du BIM : l'IFC (Industry Foundations Classes). Il s'agit d'un format de fichier orienté objet qui contient l'ensemble des données du bâtiment. Sa première version date de janvier 1997 et la dernière mise à jour a été faite en mars 2013 avec l'IFC4. Plusieurs versions co-existent et tous les logiciels ne supportent pas forcément les même versions de l'IFC, ce qui entraîne des difficultés d'interopérabilité entre logiciels

5. <http://www.mediaconstruct.fr/>

6. <http://www.buildingsmart.org/>

7. <http://www.autodesk.fr/>

8. <http://www.allplan.com/fr>

9. <http://www.bentley.com/fr-FR/>

en raison du peu de compatibilité sur certaines données. Ce format est cependant celui le plus utilisé pour le BIM. C'est un modèle de données complet qui peut s'avérer difficile à utiliser en raison notamment du grand nombre de classes permettant d'exprimer une même relation de diverses façons [17].

Bien que l'IFC facilite l'échange de données entre logiciels et partenaires d'un même projet, la perte de données et des problèmes de conversion entre les IFC et des formats CAD sont toujours présents [18, 19, 20]. Cela peut entraîner des coûts supplémentaires lors de l'échange de données entre les différents partenaires d'un projet pour vérifier et corriger si nécessaire les maquettes.

D'autres formats sont également disponibles tels que CityGML, très utilisé dans le domaine des SIG (Système d'Information Géographique). Il est cependant plus adapté pour travailler avec des ensembles de bâtiments importants comme les villes par exemple [21]. CityGML a la particularité de pouvoir modéliser un bâtiment selon divers niveaux de détails. Pour le dernier niveau, permettant de modéliser l'intérieur du bâtiment, il est recommandé d'utiliser directement le format IFC plutôt que CityGML [22]. Le BIM et le SIG sont finalement deux outils complémentaires qui peuvent être combinés pour faire la transition entre l'échelle de la ville et du bâtiment afin d'améliorer par exemple la gestion lors de la construction de nouveaux bâtiments [23]

1.2 La numérisation d'un bâtiment existant

Adopter le BIM systématiquement pour la construction de bâtiments neufs reste possible au prix d'un changement de pratiques lors de la conception. Cependant, le problème se pose pour les bâtiments anciens non numérisés. Comment créer pour un bâtiment existant sa maquette numérique ?

Différentes approches ont été développées pour reconstruire une maquette numérique 3D d'un bâtiment existant [24, 25]. Ces méthodes se différencient principalement par les données utilisées ainsi que leurs traitements associés. Cela entraîne la création de maquettes numériques n'ayant pas toutes le même niveau de détails. Cette partie analyse et compare les méthodes les plus utilisées actuellement en se basant principalement sur le type de données nécessaires à chaque méthode ainsi que sur le niveau de détail de la maquette numérique finale.

Bien qu'il n'existe pas de standard sur les informations que doit contenir la maquette numérique, il est souvent considéré que cette dernière doit être composée de trois principales composantes qui sont : la géométrie, la topologie et la sémantique. Ces trois composantes permettent de décrire entièrement le bâtiment et les éléments qui le composent. La géométrie contient toutes les informations relatives à la forme et aux dimensions du bâtiment. La topologie définit les relations entre éléments pour caractériser la structure du bâtiment. Enfin, la sémantique apporte toutes les informations complémentaires sur les éléments.

Par exemple, dans le cas d'un mur, sa géométrie est définie par le polygone d'emprise au sol et une hauteur. Les liens topologiques permettent de mettre en évidence les éléments du bâtiment en relation avec ce mur, tels que les ouvrants contenus dans le mur. L'information sémantique caractérise le mur en renseignant certaines propriétés comme par exemple

les matériaux utilisés lors de la construction. Si les trois composantes du bâtiment sont décrites correctement, la maquette numérique associée pourra être utilisée dans tous les types d'applications car elle sera valide et complète. Deux grandes familles de méthodes permettant de créer la maquette numérique d'un bâtiment existant : celles nécessitant de réaliser des acquisitions de données sur site et celles se basant sur des documents existants du bâtiment.

1.2.1 Méthodes basées sur des acquisitions de données sur site

Un certain nombre d'approches nécessitent des acquisitions préalables de données sur site. Elles se distinguent entre elles par l'instrumentation nécessaire à l'acquisition des données (du laser scanner aux caméras aériennes) et par le niveau de détails des données collectées (de la photographie aérienne d'une ville à un nuage de points 3D d'une pièce). Dans cette partie, trois familles d'approches les plus utilisées sont analysées : le relevé manuel d'un bâtiment, la photogrammétrie et le traitement de nuages de points 3D.

1.2.1.1 Relevé manuel

Il est régulièrement nécessaire de créer le plan d'un logement sans avoir recours à des géomètres. Cela est le cas lors d'une rénovation des espaces intérieurs par des particuliers ou lors de la mise en vente ou en location d'un bien par une agence immobilière. Différentes méthodes existent à faible coût pour prendre des mesures et dessiner manuellement le plan correspondant à l'aide d'un logiciel. La première méthode, la plus traditionnelle, est d'utiliser un mètre et de réaliser un croquis papier du plan en notant les différentes mesures. Le croquis est ensuite utilisé pour dessiner le plan en version numérique via un logiciel de dessin de plans architecturaux ou alors il est directement utilisé comme outil de travail. Cette méthode peut prendre beaucoup de temps car il faut effectuer toutes les mesures manuellement mais a l'avantage d'être à faible coût.

Afin de simplifier cette tâche et de gagner en précision, il est possible de réaliser un relevé grâce à un télémètre laser portable (cf. figure 1.4). Cela consiste à utiliser un appareil permettant de mesurer automatiquement les distances. Il suffit alors de pointer la cible avec l'appareil et par un calcul de déphasage entre l'émission et la réception du rayon lumineux, la distance est calculée. Ces appareils sont eux aussi accessibles au grand public. Pour acheter un télémètre standard avec une mesure comprise entre 0.30m et 50m et une précision de +/- 2mm, les premiers prix sont inférieurs à 80 euros¹⁰.



FIGURE 1.4 – Exemple de télémètre laser vendu par LEICA

Pour réaliser le plan 2D ou 3D d'une habitation en ayant à disposition un croquis avec les mesures correspondantes, des sites internet permettent de télécharger des logiciels de

10. <http://www.outil-mesure-laser.com/comparatiftelemetrelasermeilleurmetrelaser.html>

dessins de plans¹¹. Certaines solutions sont spécialement conçues pour aider l'utilisateur à créer facilement les plans d'un logement de façon intuitive comme le site ArchiFacile¹² qui propose une version à fonctionnalités réduites gratuite en ligne. D'autres logiciels proposent aussi des solutions en utilisant notamment l'image du plan comme fond pour dessiner directement les différents éléments du bâtiment en s'aidant du plan initial¹³.

Enfin pour les utilisateurs plus axés sur les nouvelles technologies, des applications sur smartphone sont maintenant téléchargeables gratuitement pour concevoir de façon guidée le plan intérieur d'un lieu comme par exemple MagicPlan¹⁴. Pour cela, l'utilisateur doit tout d'abord calibrer son appareil mobile, puis prendre des photos de l'ensemble des coins de la pièce.

Le plan est généré automatiquement et l'utilisateur peut le modifier pour l'ajuster et l'assembler avec d'autres pièces déjà numérisées. Cette application a l'avantage de pouvoir être utilisée dans un environnement où les coins de la pièce sont cachés par des meubles. Cependant, le temps nécessaire à l'acquisition de données et au traitement est long, la précision dépend fortement de la configuration de la pièce.

Les méthodes présentées précédemment sont intéressantes car elles sont peu coûteuses et réalisables par tous. Cependant, elles requièrent une main d'œuvre importante et un temps d'exécution souvent long ce qui ne répond pas à nos objectifs. De plus, ces méthodes ne permettent pas d'obtenir d'information précise sur les épaisseurs des éléments. Peu d'information sémantique est également disponible d'où une incomplétude du modèle construit. C'est pourquoi ces méthodes ne seront pas retenues par la suite car elles ne permettent pas la création d'une maquette numérique complète bien qu'elles soient efficaces dans d'autres applications comme le calcul de la surface par exemple.

1.2.1.2 Photogrammétrie

La photogrammétrie est une technique permettant de mesurer des distances à partir d'un ensemble d'images. Afin de modéliser un ou plusieurs bâtiments existants, deux types de photos peuvent être utilisés : les photographies aériennes ou terrestres

De nombreux travaux de recherche utilisent des images aériennes pour faire de la reconstruction 3D [26, 27]. Ces images sont de haute résolution et le plus souvent acquises depuis des avions ou satellites. La qualité des images dépend en grande partie des conditions météorologiques et de vol qui peuvent créer des défauts sur les images. Lors de la prise de vue aérienne, des nuages peuvent masquer certains détails de l'image tels que des parties du bâtiment. De plus, le plan de vol doit être minutieusement préparé afin de couvrir toute la zone souhaitée.

La méthode la plus courante consiste à extraire de ces images de télédétection l'empreinte extérieure des bâtiments en s'aidant notamment d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT). Les murs extérieurs ainsi que les toits de grands espaces tels que des villes sont généralement reconstruits automatiquement en un temps raisonnable [28, 29]. Actuellement, des méthodes sont élaborées pour reconstituer automatiquement les façades

11. <http://home.by.me/fr/logiciel-plans-2d/>

12. <http://www.archifacile.fr/>

13. <http://www.kozikaza.com/plan-3d-maison/>

14. <http://www.sensopia.com/english/index.html>

manquantes [30]. La figure 1.5 est un exemple d’identification d’empreinte de bâtiment grâce à la photogrammétrie aérienne.

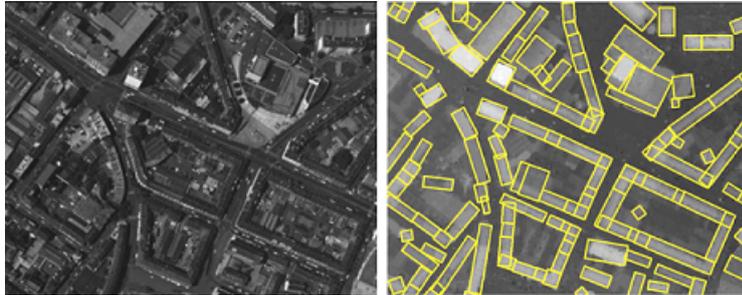


FIGURE 1.5 – Identification d’enveloppes de bâtiments sur la ville d’Amiens grâce à la photogrammétrie aérienne [28]. A gauche l’image originale et à droite le résultat de l’identification des bâtiments. Chaque bâtiment est représenté par un rectangle jaune.

Les photographies aériennes sont généralement utilisées dans le domaine des SIG (Système d’Information Géographique) et par des applications grands publics telles que le Géoportail¹⁵. L’avantage est de pouvoir traiter en même temps un quartier ou une ville. Cependant, une des principales limitations concerne le niveau de détails ou LoD (Level of Details) qui est faible : les modèles générés contiennent seulement des données sur la géométrie des éléments extérieurs tels que les murs ou les toits avec peu d’informations topologiques ou sémantiques et aucune information sur les éléments intérieurs (murs et ouvrants). Ces maquettes numériques composées de l’enveloppe externe du bâtiment peuvent être complétées par des images de façade afin de modéliser notamment les ouvrants extérieurs.

En ce qui concerne la photogrammétrie terrestre, les images sont généralement acquises depuis la rue avec différents angles de vue. Deux méthodes d’acquisition sont possibles. La première est effectuée par des véhicules équipés de plusieurs appareils photos. Grâce à cette méthode, un grand nombre de bâtiments peut être pris en photos rapidement.

La deuxième méthode d’acquisition consiste à prendre un ensemble de photos d’un bâtiment de l’extérieur respectant un fort recouvrement entre chaque photo. Cette méthode est plus longue à mettre en œuvre mais permet d’obtenir un grand nombre de photos d’un même bâtiment. Les photos sont ensuite utilisées dans deux principales applications :

1. Reconstruire une maquette 3D du bâtiment à partir de plusieurs images.
2. Utiliser les images de façades pour identifier et différencier les éléments externes du bâtiment (ouvrants, balcons).

Dans le premier cas, le processus consiste à prendre un ensemble de photos du bâtiment [31, 32] qui devront être calibrées et orientées afin d’extraire les coordonnées 3D du modèle [33]. Ce traitement est le plus souvent automatisé même si la mise en correspondance de points similaires entre plusieurs images peut être une étape délicate.

Dans le second cas, seule la façade du bâtiment est traitée afin d’extraire les dimensions et les positions relatives des éléments comme par exemple les portes ou les fenêtres. Une des principales difficultés est liée à la diversité des éléments architecturaux du bâtiment

15. <http://www.geoportail.gouv.fr/accueil>

(fenêtres de formes et de tailles variées, différences entre étages, présence de balcons, etc.). C'est pourquoi cette méthode est actuellement plus robuste pour des bâtiments composés d'un motif régulier.

La sémantisation automatique d'images de façade est utile afin de compléter d'autres méthodes de reconstruction 3D dans le but d'enrichir la maquette numérique et d'en augmenter son niveau de détails [34, 35, 36]. La figure 1.6 illustre le résultat d'une sémantisation d'image de façade. De même que pour la méthode précédente, seuls les éléments extérieurs du bâtiment avec peu d'information topologique et sémantique sont identifiés et aucune information sur l'aménagement intérieur n'est disponible.



FIGURE 1.6 – Exemple de sémantisation d'une image de façade [35]. La partie verte représente le rez-de-chaussée composé de vitrines de magasins, la partie jaune est le corps du bâtiment et la partie rouge et bleue correspondant aux éléments du toit (fenêtres et toiture)

1.2.1.3 Nuages de points 3D

Les nuages de points 3D utilisés pour modéliser des scènes 3D sont généralement obtenus grâce à de la télédétection LASER, appelée couramment LIDAR (Light Detection And Ranging), consistant à segmenter un nuage de points 3D obtenu grâce à un système d'acquisition par balayage terrestre ou aéroporté [37].

Un certain nombre de méthodes de reconstruction 3D se basent sur des traitements de nuages de points terrestres 3D [38, 39]. Pour acquérir de telles données, des scanners lasers 3D terrestres sont positionnés en différents points stratégiques autour mais aussi à l'intérieur même du bâtiment lorsqu'il est nécessaire de modéliser l'intérieur. Lors d'une acquisition, un laser scanner collecte en peu de temps des millions de points qui seront par la suite traités afin d'en extraire ceux représentant le bâtiment et de déterminer par exemple l'occupation spatiale de la structure.

L'environnement du bâtiment joue un rôle important lors de cette phase d'acquisition et peut entraîner une part significative de bruit. En extérieur, des éléments tels que des arbres peuvent cacher des parties du bâtiment et en intérieur le mobilier est lui aussi scanné et par la suite difficile à distinguer des murs dans le nuage de points 3D.

Le processus de conversion du nuage de points 3D en un BIM est composé de trois principales étapes : l'acquisition des données, les prétraitements et la modélisation [40]. Ce processus nécessite de nombreuses interventions humaines et il est en grande partie réalisé manuellement ce qui peut être long, subjectif et source d'erreurs [41]. Selon la

taille du bâtiment et le niveau de détails attendu, plusieurs mois peuvent être nécessaires pour obtenir une maquette numérique complète du bâtiment. Cependant, l'utilisation d'un scanner reste la méthode la plus précise, largement utilisée dans de nombreux cas. Beaucoup de travaux sont actuellement effectués pour automatiser ce processus [42, 43, 44, 45].

A l'inverse des deux méthodes présentées précédemment, les lasers scanners permettent de numériser l'intérieur du bâtiment et d'obtenir des informations géométriques intérieures et extérieures avec des éléments topologiques. Le mobilier présent complique souvent les traitements car il masque certains détails de la pièce mais des traitements permettent actuellement de reconstruire des espaces en gérant les occlusions et les artefacts produits durant la phase d'acquisition de données [46]. La figure 1.7 est un exemple de reconstruction d'espaces 3D réalisée grâce à plusieurs acquisitions.

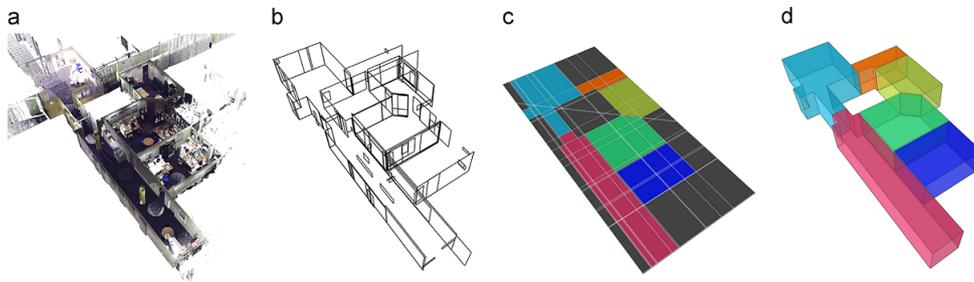


FIGURE 1.7 – Exemple de reconstruction à partir d'un nuage de points 3D. (a) nuage de points, (b) extraction des murs, (c) réalisation du plan 2D des espaces, (d) création des volumes des espaces [46].

Une des principales limites de cette méthode est que les modèles générés à partir de nuages de points sont souvent constitués seulement de données géométriques (à partir desquelles l'information topologique peut être extraite). L'ajout d'information sémantique implique des traitements et de l'acquisition de données supplémentaires [47]. Par exemple, des caméras couplées au scanner laser permettent de créer des maquettes numériques plus complètes en exploitant la couleur des points 3D [48, 49]. Dans le même esprit, d'autres travaux de recherche combinent des appareils photos au scanner laser pour générer des façades sémantisées [50].

1.2.2 Méthodes basées sur des documents existants

A l'inverse des méthodes présentées précédemment pour lesquelles une phase d'acquisition de données est nécessaire, celles présentées dans cette section se basent uniquement sur l'extraction d'information à partir de documents existants. Ceux-ci sont le plus souvent élaborés lors de la phase de conception du bâtiment ou après la construction par les services de gestion du patrimoine puis archivés. Un des principaux avantages est qu'ils sont directement disponibles dans la plupart des cas. Cependant, ces documents ne sont pas systématiquement mis à jour au fur et à mesure des évolutions du bâtiment ce qui est un problème récurrent quel que soit le type de documents considérés. Dans cette partie, trois types de documents sont présentés : ceux réalisés lors de la phase de conception du bâtiment comme les esquisses, ceux au format numérique et enfin les documents papiers.

1.2.2.1 Esquisses

Les esquisses sont à la base de tout projet de conception. Elles servent à poser les premières idées et les grandes lignes architecturales du projet. Il est souvent nécessaire de réaliser une multitude d’esquisses avant de passer à une autre phase de la conception. C’est une étape essentielle d’un projet de construction pendant laquelle d’éventuelles erreurs de conception sont identifiées puis corrigées [51]. Les esquisses peuvent être réalisées de façon traditionnelle sur papier mais aussi directement sur un appareil mobile tel qu’une tablette ou une table numérique [52].

Dans le premier cas, les esquisses sont traitées une fois les dessins achevés et celles-ci sont alors considérées comme des images [53, 54]. La difficulté principale du traitement d’esquisses en tant qu’images réside dans l’interprétation des traits de dessin. En effet, il n’est pas rare dans une esquisse de dessiner plusieurs traits identiques qui ne sont en réalité qu’un seul trait. De plus, la précision du dessin est parfois insuffisante, sans mesure précise des murs par exemple. Des traitements supplémentaires sont alors nécessaires pour déterminer les liens entre les éléments.

Dans le deuxième cas, les dessins sont analysés au fur et à mesure de leur conception en étudiant les mouvements du crayon numérique. Cela permet de déterminer automatiquement les formes dessinées et de travailler en temps réel pour guider éventuellement le dessinateur ou générer automatiquement la maquette numérique 3D associée au croquis [55]. Plusieurs solutions proposent aussi d’utiliser des systèmes multi-agents pour interpréter et corriger le dessin en proposant par exemple de redresser des segments qui ne seraient pas totalement droits [56, 57, 58]. L’approche multi-agent est adaptée à la reconnaissance d’esquisses en temps réel car l’utilisateur n’annonce pas à l’avance l’action qu’il va entreprendre, des formes complexes peuvent être dessinées qui sont facilement décomposées par les différents agents du système. De plus, ce système est flexible et permet de reconnaître un nombre illimité d’éléments graphiques.

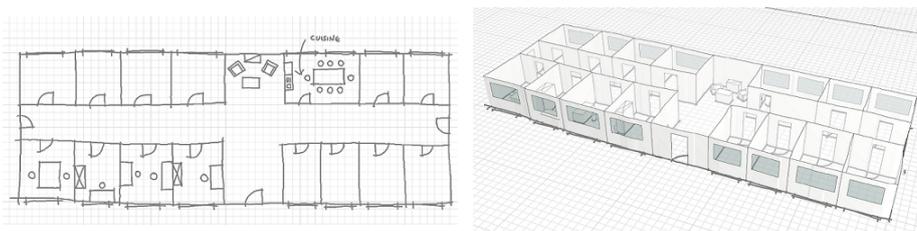


FIGURE 1.8 – Exemple de reconstruction d’un modèle 3D à partir d’une esquisse [55].

Cependant les dessins réalisés lors de phase de conception d’un bâtiment ne sont pas forcément conservés ni archivés dans le temps. Il y a un risque que ceux-ci ne soient plus disponibles au moment de la numérisation du bâtiment. De plus, rien ne garantit que les esquisses réalisées correspondent réellement au bâtiment construit. Il n’y a pas forcément de corrélation entre l’idée de la conception du bâtiment et sa réalisation notamment sur les proportions structurelles pour garantir la robustesse de la reconnaissance. La géométrie est à ce stade approximative, de même que la topologie qui n’est que partielle, la sémantique est quasiment inexistante car il n’y a pas encore de considération technique à ce stade de la conception.

1.2.2.2 Plans au format CAD

Les plans au format CAD sont en version numérique. Il n'est donc pas nécessaire d'effectuer de prétraitements car ils sont déjà dans un format vectoriel. C'est à dire qu'ils ne sont pas composés comme les images par des pixels qu'il faut interpréter mais par des primitives géométriques telles que des lignes, des polygones ou des cercles. Un plan CAD est le plus souvent décomposé en calques regroupant chacun un type d'éléments du bâtiment : une couche pour les murs, une autre pour les fenêtres, etc. L'organisation en calques n'est pas standardisée et chaque utilisateur est libre de créer les couches dont il a besoin. Cela rend plus difficile les traitements automatiques car il faut dans un premier temps identifier l'ensemble des couches et leur contenu avant de les assembler pour générer une maquette numérique cohérente.

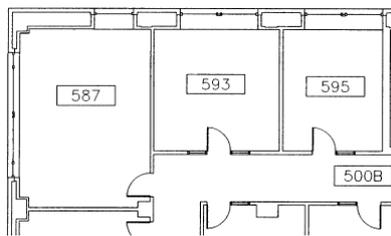


FIGURE 1.9 – Exemple de fichier au format CAD [59].

Il existe différentes méthodes de conversion d'un plan CAD en maquette 3D mais celles-ci nécessitent une forte implication de l'utilisateur au cours des traitements afin d'indiquer par exemple le contenu de chaque calque [59, 60, 61]. Un des avantages des plans au format CAD est que ceux-ci sont indépendants de la définition grâce à l'utilisation d'un format vectoriel. Ils contiennent aussi beaucoup plus d'informations qu'une esquisse en terme de géométrie et de topologie [62].

Cependant, ces plans numériques ne sont pas disponibles pour des vieux bâtiments qui ont été construits avant l'émergence des outils d'aide à la conception par ordinateur. En effet, la CAO s'est particulièrement développée dans les années 1980 donc pour tous les bâtiments construits avant cette date, il n'y a quasiment aucune chance de retrouver des données numériques. Cela concerne au moins 80% du parc immobilier car seulement 20% des bâtiments ont été construits entre 1990 et 2010 (cf. figure 1.1).

1.2.2.3 Plans 2D scannés

Les plans 2D scannés sont obtenus à partir des plans papiers du bâtiment qui ont été préalablement numérisés grâce à un scanner optique qui transforme le plan original correspondant au plan architectural final du bâtiment en une image numérique. Ces plans sont généralement de qualité variable et ne sont pas forcément mis à jour. L'image résultante peut donc contenir du bruit dû principalement à la qualité du plan et parfois à celle du scanner optique qu'il faut éliminer.

Par rapport aux esquisses, ces plans contiennent beaucoup d'informations qui ne sont pas toujours utiles pour la reconstruction de la maquette numérique (traits de côte, mesures, textes, mobiliers). Des méthodes permettent d'extraire le texte de l'image afin de ne traiter dans un premier temps que les éléments graphiques et de rajouter par la suite l'information sémantique portée par le texte. Les traitements consistent à extraire de

l'image des primitives géométriques telles que des segments ou des arcs de cercles afin de les convertir en éléments caractéristiques du bâtiment (murs, ouvrants, pièces) pour reconstruire la maquette numérique [63, 64, 65]. La figure 1.10 illustre des travaux d'identification de murs dans une image de plan.

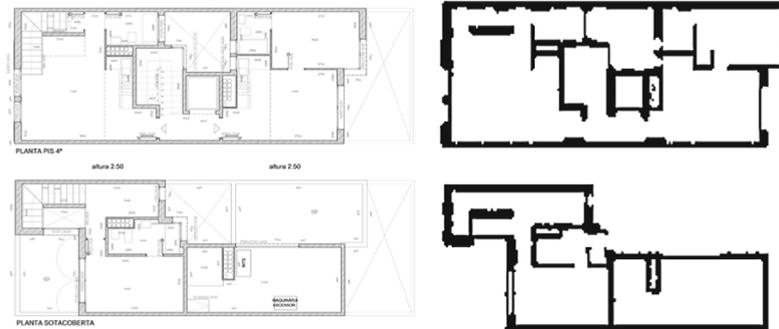


FIGURE 1.10 – Exemple d'identification de murs dans une image de plan [65].

Cependant, des erreurs ou des imprécisions sur le plan peuvent générer des incohérences dans la maquette numérique qui ne peuvent pas toujours être résolues automatiquement (problèmes topologiques ou géométriques). De plus, certaines informations géométriques manquent pour générer une maquette complète telles que les hauteurs des murs ou des ouvrants.

1.2.3 Comparaison des méthodes existantes

Une grande diversité de méthodes existe pour générer des maquettes numériques de bâtiments existants. Cependant, aucune n'est meilleure qu'une autre, le choix d'une méthode au détriment des autres dépend de l'application et doit se faire selon leur adéquation avec certains critères tels que :

1. La nature de l'environnement du bâtiment qui peut être un obstacle à l'utilisation de certaines méthodes.
2. Le budget et le temps alloués au projet.
3. La précision finale attendue pour la maquette numérique en fonction de son utilisation future.

Les tableaux 1.2 et 1.3 récapitulent les critères ci-dessus définis de manière empirique.

TABLE 1.2 – Comparaison des méthodes de génération de maquette numérique 3D lorsqu’une acquisition de données sur site est nécessaire.

Thèmes	Relevé manuel	Images aériennes	Images terrestres	Scanner laser
Acquisition des données				
1.Coût	Faible	Élevé	Moyen	Élevé
2.Temps	Élevé	Moyen	Moyen	Élevé
3.Influence de la taille et complexité de la scène	Faible	Forte	Forte	Forte
4.Influence des conditions environnementales	Faible	Forte	Moyenne	Moyenne
5.Portabilité des équipements	Élevée	Faible	Élevée	Moyenne
6.Robustesse des équipements	Élevée	Élevée	Élevée	Élevée
Caractéristiques des données				
7.Type	Points 2D	Images	Images	Points 3D
8.Niveau de détails	Faible	Faible	Moyen	Élevé
9.Volume des données	Faible	Élevé	Moyen	Élevé
Traitements des données				
10.Durée du processus	Élevée	Moyen	Moyen	Élevé
11.Degré d’automatisation	Faible	Moyen	Élevé	Faible
12.Complexité du processus	Faible	Moyenne	Moyenne	Élevée
Caractéristiques des modèles générés				
13.Précision géométrique	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Élevée
14.Précision topologie	Moyenne	Moyenne	Moyenne	Élevée
15.Richesse sémantique	Faible	Faible	Moyenne	Moyenne

La méthode consistant à relever manuellement l’ensemble des mesures d’un bâtiment pour reconstruire le plan 2D n’est pas adaptée à la reconstruction de maquettes numériques complètes d’un ensemble de bâtiments existants. Cette méthode nécessite à la fois une main d’œuvre importante et un accès à tout le bâtiment pendant un temps assez long ce qui augmente considérablement le coût de numérisation. De plus, suivant que le relevé soit effectué par des géomètres ou non, la précision du plan ne sera pas égale.

Les approches basées sur de l’imagerie produisent des modèles contenant peu d’informations sémantiques et pas d’éléments intérieurs. Ces méthodes sont suffisantes pour des applications impliquant seulement la forme extérieure du bâtiment telles que la réalisation d’environnements virtuels de quartier. Dans ce cas, il est également possible de texturer la maquette numérique avec des images de façades pour un meilleur rendu. Cependant, ces méthodes deviennent insuffisantes pour des applications plus avancées nécessitant plus d’informations détaillées telles que de l’aide à la navigation intérieure [66, 67].

Les approches utilisant le scanner laser permettent la génération de maquettes précises et fiables qui peuvent être facilement importées dans des logiciels BIM. Cependant, elles exigent aussi un équipement coûteux, bien qu’un appareil puisse être amorti sur plusieurs projets, une main d’œuvre importante et un temps conséquent d’acquisition de données

et de traitements. L'utilisation d'un laser scanner est donc utile pour des projets nécessitant une grande précision mais devient un peu trop coûteuse dans le cadre d'un projet de rénovation de masse sur un grand ensemble de bâtiments. De plus, la taille des données peut entraîner des problématiques liées au stockage et au temps de traitement.

TABLE 1.3 – Comparaison des méthodes de génération de maquette numérique 3D à partir de documents existants du bâtiment.

Thèmes	Esquisses	Plans au format CAD	Plans papier 2D
Acquisition des données			
1.Disponibilité	Faible	Moyenne	Élevée
2.Qualité	Moyenne	Forte	Moyenne
3.Mise à jour	Faible	Moyenne	Moyenne
Caractéristiques des données			
7.Type	Image	Format vecteur	Image
8.Niveau de détails	Faible	Élevé	Élevé
9.Volume des données	Faible	Moyen	Faible
Traitements des données			
10.Durée du processus	Moyenne	Moyenne	Moyenne
11.Degré d'automatisation	Moyen	Élevé	Moyen
12.Complexité du processus	Moyenne	Moyenne	Moyenne
Caractéristiques des modèles générés			
13.Précision géométrie	Moyenne	Élevée	Élevée
14.Précision topologie	Faible	Élevée	Élevée
15.Richesse sémantique	Faible	Élevée	Élevée

Les méthodes se basant sur des documents existants du bâtiment (esquisses, plans scannés 2D, plans au format CAD) ont des avantages significatifs. Le principal étant que ces documents sont disponibles directement sans coût supplémentaire. La taille des données est limitée et les traitements ne nécessitent pas de disposer de grandes capacités de calculs. Les données permettent de modéliser le bâtiment dans son intégralité (éléments intérieurs et extérieurs).

Cependant, comme les méthodes qui se fondent sur des photographies aériennes, elles peuvent produire des maquettes numériques incomplètes ou comportant des incohérences car elles sont dépendantes de la qualité et de la mise à jour des documents utilisés. De plus, ces données sont le plus souvent en 2D et ne donnent pas accès à des informations indispensables à la reconstruction de la maquette numérique telles que les hauteurs des murs ou des ouvrants. L'absence d'un standard ainsi que la grande variété de formats existants et de représentations compliquent la mise en place de traitements automatiques de reconstruction de la maquette numérique.

Les paragraphes précédents confirment que la sélection d'une méthode dépend fortement des objectifs et contraintes de l'application finale de la maquette numérique. Cer-

taines méthodes sont coûteuses mais produisent des maquettes avec une description fine de la géométrie ou de la topologie, alors que d'autres sont plus accessibles financièrement mais les résultats peuvent être moins précis. Utiliser une combinaison de ces différentes méthodes pourrait permettre de profiter pleinement du potentiel de chaque méthode.

Une solution déjà proposée est de coupler l'interprétation de nuages de points 3D avec une base de données CAD 3D pour vérifier et valider les objets créés par comparaison avec les objets existants de la base [68]. D'autres utilisent à la fois des nuages de points 3D ainsi que des photographies de la façade du bâtiment et des techniques de thermographie infrarouge afin d'obtenir des maquettes numériques avec une texture des murs pour aider à la prise de décision dans le cadre de la rénovation de bâtiments existants [69].

Les approches utilisant des documents existants du bâtiment et ne nécessitant pas d'acquisition de données exhaustives sont les plus rentables. Cependant, elles présentent quelques limitations qui peuvent être compensées par l'utilisation de méthodes complémentaires telles que de l'imagerie. L'approche que nous envisageons est donc de combiner la génération de maquette numérique 3D de bâtiment à partir d'un plan 2D scanné avec d'autres sources de données ne nécessitant ni d'acquisition complexe de données, ni de traitements lourds. En effet, afin d'enrichir et de mettre à jour la maquette numérique, des traitements complémentaires tels que la segmentation d'images de façade font partie des solutions possibles. Une telle approche demande néanmoins d'avoir des outils et méthodes efficaces pour convertir un plan 2D scanné en maquette numérique.

1.3 L'analyse de plans architecturaux

L'analyse de plans architecturaux à partir d'images est l'objet de nombreux travaux notamment dans le domaine d'analyse de documents pour interpréter une image de plan. Dans cette partie, les étapes clés du processus de conversion d'un plan 2D scanné vers une maquette numérique sont présentées.

1.3.1 Processus général

Pour rappel, une image d'un plan papier 2D est obtenue à partir d'un document existant du bâtiment qui a été préalablement numérisé par un scanner optique qui transforme le plan papier en une image numérique.

En 1992, Koutamanis [70] posait les fondations de ce thème de recherche en décrivant les étapes nécessaires pour convertir un plan papier en un plan numérique. Le processus général de conversion d'un plan 2D en une maquette numérique 3D de bâtiment est représenté en figure 1.11. Ce schéma est celui le plus utilisé dans la littérature, bien que toutes les solutions n'impliquent pas forcément toutes les étapes. Deux principales étapes sont présentes dans ce processus : l'extraction et la reconnaissance des formes géométriques 2D de l'image afin d'identifier les éléments du bâtiment, la validation et la correction de la maquette numérique. Au final, la maquette est exportée dans un format compatible avec le BIM.

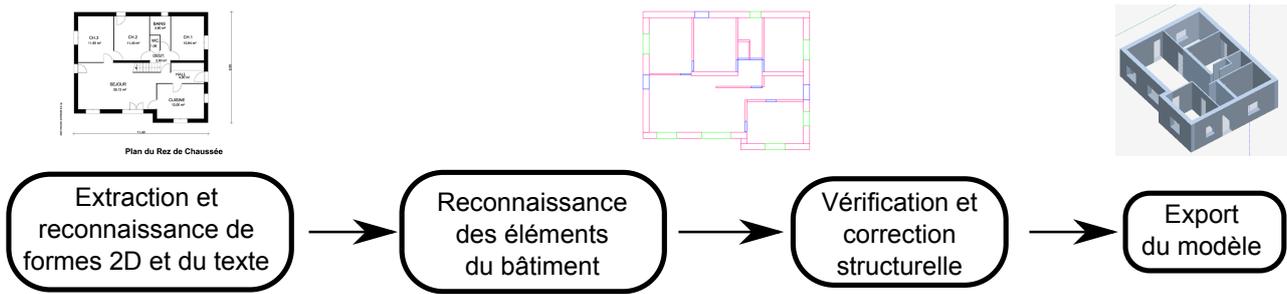


FIGURE 1.11 – Schéma général de conversion d'un plan 2D en BIM

Un plan architectural contient une grande quantité d'informations qui ne sont pas intégralement exploitables sur l'ensemble des étapes de la reconstruction 3D. C'est pourquoi, des traitements préalables sur l'image sont nécessaires pour supprimer les éléments inutiles (traits de côte, titre, mobilier, etc.) et réduire le bruit qui peut parfois être généré par le scanner lui-même [71]. Afin de diminuer le temps d'exécution, le plan peut également être séparé en plusieurs images qui sont traitées indépendamment les unes des autres avant de fusionner les résultats [72]. La qualité du plan joue un rôle primordial dans cette phase de nettoyage de l'image afin de ne pas supprimer de l'information utile ou au contraire de créer des erreurs en laissant de l'information qui serait mal interprétée.

Dans cette partie, deux grandes étapes du processus sont présentées plus en détails : l'extraction et la reconnaissance des éléments du plan pour identifier les éléments du bâtiment ainsi que la validation et la correction des maquettes numériques.

1.3.2 Extraction et reconnaissance des éléments du plan

Une première étape consiste à nettoyer partiellement l'image et à appliquer des traitements tels qu'une binarisation pour en améliorer sa qualité et mettre en évidence les éléments d'intérêt. Le nettoyage de l'image réside en la suppression d'éléments sur le plan comme par exemple des photos ou autres. La binarisation est un traitement qui transforme l'image afin qu'elle soit uniquement constituée de pixels noirs et blancs ce qui facilite les traitements.

Trois méthodes de binarisation peuvent être réalisées. Dans le cas d'une *binarisation globale*, une valeur de seuil unique est utilisée sur toute l'image pour déterminer le type de pixels. Lors d'une *binarisation locale*, la valeur finale d'un pixel dépend de lui-même et d'informations locales incluses dans l'histogramme qui permet d'indiquer le degré d'homogénéité correspondant à chaque niveau de gris dans l'image. Pour la *binarisation dynamique*, la valeur du seuil d'un pixel dépend des pixels voisins [73]. Par rapport à la binarisation locale, le voisinage est élargi, l'image est préalablement divisée en blocs disjoints pour lesquels un histogramme local est calculé. La dernière méthode est celle qui limite le plus la perte d'information en permettant une analyse plus fine au niveau de chaque pixel.

Une fois l'image nettoyée et binarisée, deux étapes clés sont nécessaires : extraire les primitives géométriques de l'image comme les cercles ou les segments puis reconnaître les éléments du bâtiment tels que les murs, les portes ou encore les pièces. Nous allons ici décrire brièvement ces deux étapes qui seront détaillées dans le chapitre 2.

1.3.2.1 Extraction des primitives géométriques

Le but de la phase d'extraction des primitives géométriques est d'identifier dans le plan un ensemble de formes géométriques pouvant représenter des éléments significatifs plus complexes du bâtiment. Dans une majorité d'études, le texte est d'abord extrait de l'image afin qu'il ne soit pas confondu avec des primitives géométriques et qu'il puisse être traité séparément. L'état de l'art sur ce sujet est conséquent car issu du domaine de l'analyse de documents textuels. L'une des principales difficultés réside dans l'automatisation des traitements en raison de l'hétérogénéité des images [74]. Le texte est essentiel dans le plan car il intègre une partie de l'information sémantique telle que les noms des pièces par exemple.

En ce qui concerne l'analyse de documents architecturaux, le texte peut avoir différentes orientations et polices en fonction de la configuration du plan ce qui rend son identification plus difficile. De plus, la qualité de l'image influe fortement sur la pertinence des résultats et sur le risque de confusions entre le texte et les éléments géométriques tels que du mobilier ou un escalier [75, 76].

Afin d'extraire du plan les primitives géométriques, la *vectorisation* est une méthode très courante. Elle permet de convertir des données au format raster en format vecteur : des ensembles de pixels sont transformés en primitives géométriques [77]. Dans le domaine plus spécifique de l'analyse de plans architecturaux, de nombreuses méthodes ont été développées et testées. Une des principales contraintes lors de la vectorisation est de conserver l'information concernant la géométrie de l'élément ainsi que son épaisseur, indispensable pour la reconstruction des murs [78, 79, 80].

Une fois les primitives géométriques extraites du plan, elles sont ensuite assemblées afin de reconstituer les éléments du bâtiment qui permettront de reconstruire la maquette numérique associée.

1.3.2.2 Reconnaissance des éléments du bâtiment

Lors de la phase de reconnaissance des éléments du bâtiment, différents objets sont extraits : murs, ouvrants, pièces grâce à la recherche de motifs ou de symboles spécifiques dans l'image. Pour cela, les primitives géométriques définies précédemment sont utilisées afin de reconstruire les éléments selon un schéma de cohérence pré-établi. Dans cette section, la recherche de symboles est présentée en utilisant les travaux réalisés dans le domaine de reconnaissance de formes à partir d'images.

Les symboles présents dans un plan architectural jouent un rôle important. Ils peuvent représenter une porte, une fenêtre mais aussi du mobilier. Dans la littérature, deux types de motifs sont identifiés : ceux basés sur la forme des objets tels que des portes ou des fenêtres et ceux basés sur la texture des objets tels que des hachures représentant un mur.

Depuis quelques années, beaucoup de travaux de recherche se sont focalisés sur la reconnaissance des symboles dessinés à la main lors de la réalisation d'esquisses [81]. En ce qui concerne les plans architecturaux, le processus de reconnaissance est généralement complexe et demande beaucoup de temps en raison notamment de la diversité de représentations possibles pour un même élément. En effet, un mur peut par exemple être représenté par un rectangle aux bords noirs sur fond noir, blanc ou hachuré.

Pour remédier à cette difficulté, un certain nombre de méthodes de reconnaissance de symboles utilisent des bases de données de règles [82, 83] qui peuvent être dynamiquement adaptées quand de nouveaux symboles sont découverts [84, 85, 86]. Chaque élément de la base est décrit par un ensemble de règles permettant de les identifier en comparant les dimensions géométriques des éléments. Par exemple, un losange peut être décrit par un ensemble de 4 segments dont les sommets sont à égale distance. Une période d'apprentissage est alors nécessaire sur un ensemble de plans pour créer une base représentative d'éléments et fixer les paramètres inhérents aux règles. Il faut également être vigilant à ne pas disposer dans la base des définitions redondantes pour un même élément.

Certains auteurs proposent des améliorations à ce schéma général. Par exemple, le concept de *repeat mode* permet d'identifier des symboles dont une des primitives géométriques est récurrente dans l'image [87]. Ce concept s'applique à des objets comme des escaliers qui sont généralement représentés par un ensemble de segments parallèles. Valveny et al. [88] utilisent des motifs déformables pour identifier deux symboles représentant le même élément du bâtiment mais qui serait dessiné avec de faibles modifications telles que des translations, rotations et changements d'échelle. De plus, ils considèrent aussi le cas où des déformations locales sont présentes sur le symbole comme une modification d'un segment.

Une fois les éléments du bâtiment reconnus puis assemblés, une première maquette numérique est générée. Cependant, des erreurs ou des incohérences peuvent être apparaître à différentes étapes de la reconnaissance comme une mauvaise interprétation des formes géométriques ou un mur manquant. C'est pourquoi, l'étape suivante est consacrée à la vérification de la maquette numérique afin de la corriger et la compléter.

1.3.3 Validation et correction

Une maquette numérique est validée selon deux axes distincts. Le premier est focalisé sur la cohérence du bâtiment selon des critères architecturaux. Les vérifications portent alors sur la cohérence structurelle et informatique des objets ainsi que leurs relations en se basant sur leurs composantes géométriques, topologiques et sémantiques.

Le deuxième est axé sur le fonctionnement et l'usage du bâtiment. Dans ce dernier cas, on suppose généralement que la maquette numérique est valide au plan architectural, mais on cherche à évaluer certaines de ses propriétés pour des usages particuliers comme par exemple la conformité aux schémas d'évacuation d'urgence.

1.3.3.1 Aperçu général du processus de vérification et de validation

En 2009, Eastman et al. [89] définissent les quatre principales étapes de la procédure de vérification et de validation d'une maquette numérique quel que soit le type de vérification envisagée. La première étape consiste à élaborer un ensemble de règles de vérification pour l'évaluation. Par exemple, dans le cadre d'une mise aux normes d'accès handicapé, on peut vérifier la largeur des portes. Ces règles sont le plus souvent élaborées avec l'aide d'un spécialiste du bâtiment pour qu'elles soient logiques et pertinentes. Dans la deuxième étape, les informations nécessaires à la vérification des règles sont extraites de la maquette numérique. Ensuite, la phase de traitement peut commencer, chaque règle est testée sur le bâtiment et les erreurs enregistrées. La quatrième et dernière étape consiste à générer

un rapport comprenant une description détaillée de chaque erreur. Une visualisation du bâtiment et des erreurs est souvent effectuée par l'intermédiaire d'un logiciel adapté.

Le processus décrit ci-dessus prend beaucoup de temps lorsqu'il est exécuté dans son intégralité. En effet, il implique des connaissances et compétences spécifiques ainsi qu'un nombre significatif d'interventions humaines pour concevoir et mettre en forme les règles. Cependant, un même ensemble de règles peut être utilisé pour vérifier plusieurs maquettes numériques même si certains paramètres peuvent dépendre spécifiquement du bâtiment. Une fois les erreurs détectées, il faut également effectuer toutes les corrections nécessaires. C'est pourquoi, un certain nombre de travaux cherchent à automatiser au mieux l'ensemble de ces tâches.

Afin de vérifier chaque règle, il faut pouvoir extraire l'information recherchée dans le bâtiment. Or, celle-ci n'est pas toujours accessible en raison du format de données initial de la maquette numérique. Comme évoqué précédemment (cf. section 1.1.2) le principal standard du BIM est actuellement l'IFC. Cependant, de nombreux logiciels de création manuelle de modèles 3D comme Sketchup¹⁶, Blender¹⁷ ou Sweet Home 3D¹⁸ utilisent leur propre format de données et ne proposent pas tout le temps un export ou un import au format IFC. De plus, ils ne donnent pas toujours accès à la description du modèle interne utilisé, qui est souvent un format propriétaire fermé. C'est pourquoi la grande variété de formats disponibles pour travailler sur des maquettes 3D de bâtiments pose des problèmes d'interopérabilité [90]. Par exemple, l'IFC ou d'autres formats n'incluent pas forcément toutes les informations utiles à la vérification et il est parfois nécessaire de compléter la maquette en ajoutant des données additionnelles avant de débiter le cycle de vérification [91].

1.3.3.2 Vérification générale de la maquette numérique

Cette section présente différentes méthodes permettant de vérifier les propriétés d'une maquette numérique, par rapport à diverses normes et règles communes à l'ensemble des bâtiments, ainsi que de valider la cohérence informatique de la maquette et des objets la composant. Lors de ces traitements, des règles spécifiques portant sur les caractéristiques géométriques, topologiques et sémantiques des différents éléments du bâtiment permettent la vérification et la validation de la maquette numérique.

Niemeijer et al. [92] proposent un système pour vérifier automatiquement la cohérence des modèles IFC selon des règles prédéfinies. Ce système est développé dans le cadre d'un outil permettant à des clients de personnaliser eux-même le plan de leur maison. Initialement, un architecte dessine un plan que les clients pourront modifier sans avoir à faire appel à ce dernier. Afin d'éviter que les actions des clients n'entraînent la génération d'incohérences sur la maquette, des contraintes sur la géométrie du bâtiment telles que "Chaque fenêtre doit avoir une hauteur inférieure à 1200 mm" sont mises en place.

Borrmann et al. [93] proposent une démarche de vérification lors de la phase de conception du bâtiment dans un contexte collaboratif. Un membre de l'équipe travaillant sur le projet peut par exemple décider d'appliquer une contrainte spatiale sur un ensemble

16. <http://www.sketchup.com>

17. <http://www.blender.org>

18. <http://www.sweethome3d.com>

d'objets. Cette règle va ensuite être appliquée à la totalité des objets impactés et va être automatiquement répercutée sur l'ensemble du projet afin d'éviter d'éventuels conflits.

Des solutions logicielles sont également disponibles sur le marché telles que "Solibri Model Checker"¹⁹ qui a été développée par la compagnie Solibri et qui permet l'analyse d'une maquette BIM au niveau de son intégrité informatique et de sa qualité. Cet outil permet de vérifier et de valider une maquette numérique au format IFC à travers un ensemble de règles prédéfinies, portant sur la structure du bâtiment, le type de composants, les espaces, etc. L'utilisation d'un logiciel dans lequel les analyses sont déjà implémentées présente l'avantage pour l'utilisateur de ne devoir fournir qu'une maquette numérique comprenant toutes les données géométriques, topologiques et sémantiques nécessaires à la validation.

Afin de remédier au manque d'information de certains modèles, des solutions proposent d'utiliser des sources de données additionnelles comme une base de données externe comprenant les informations manquantes ou alors de créer des extensions du standard IFC [94].

Il faut également noter la proposition de Horna et al. [95] consistant à vérifier directement le bâtiment dans sa forme 2D, en utilisant un plan vectoriel 2D, afin de corriger notamment la géométrie d'intersections mal définies entre éléments avant d'effectuer une reconstruction 3D. L'objectif principal est d'obtenir un plan 2D correct sans erreur ni incohérence. En ce qui concerne la sémantique, seuls les noms des pièces sont pris en compte et l'utilisateur doit alors renseigner manuellement les pièces sans nom.

1.3.3.3 Validation selon un scénario spécifique

Si la maquette numérique est cohérente selon les critères ci-dessus, alors des évaluations complémentaires sont effectuées pour valider des besoins ou des scénarios spécifiques en usage. La composante dynamique est ici prise en compte.

Un domaine largement abordé dans la littérature concerne la sécurité liée au bâtiment. Par exemple, Casella et al. [96] effectuent des tests en étudiant plus spécifiquement les chemins d'évacuation d'urgence. D'autres travaux sont focalisés sur la sécurité à mettre en place durant la phase de construction du bâtiment [97, 98]. Le but est de détecter grâce à la maquette numérique les situations dangereuses pouvant arriver lors de la phase de construction du bâtiment pour prévenir les ingénieurs de construction et les managers. Ces outils testent entre autres des configurations possibles de positionnement d'échafaudages pour trouver le niveau de protection optimal [99].

Un autre type de validation d'usage concerne la vérification de la conformité du bâtiment par rapport à des lois gouvernementales ou des normes dans le cas de projet de rénovation par exemple ou pour s'assurer que le bâtiment respecte bien les différentes réglementations en vigueur.

Yurchshyna et al. [100] proposent un système de vérification semi-automatique de projet de construction. Cela demande notamment d'avoir recours à un expert du domaine pour aider à interpréter les lois et les erreurs. De la même façon, Ding et al. [101] travaillent sur une solution permettant d'appliquer des tests à différents stades de conception et de

19. <http://www.solibri.com/products/solibri-model-checker/>

construction du bâtiment.

D'autres travaux sont focalisés sur l'analyse du risque de développement de moisissure dans un bâtiment en utilisant une approche ontologique [102] basée sur des règles sémantiques. Les risques de moisissure sont évalués en fonction du type de mur et de la présence ou non de système de ventilation mécanique contrôlée (VMC).

Toutes les méthodes qui sont ainsi basées sur une application spécifique du bâtiment demandent d'avoir des maquettes numériques précises dans lesquelles il faut préalablement extraire l'information nécessaire. C'est pourquoi, une fois encore le choix du format de données est une question primordiale afin de pouvoir extraire le plus rapidement possible l'information relative à l'application traitée et de générer celle manquante par l'utilisation de données complémentaires par exemple.

1.4 Discussion et conclusion sur l'orientation des travaux

Les recherches pour générer automatiquement des maquettes numériques 3D de bâtiments existants ont commencé dans les années 1990 avec l'émergence des Technologies de l'Information et de la Communication (TIC ou ICT en anglais) dans le domaine de la construction. L'introduction du BIM a favorisé de nouvelles pratiques et possibilités de représenter et gérer le cycle de vie des bâtiments.

De nombreux facteurs économiques, sociologiques et environnementaux sont révélateurs de la volonté de rénover les bâtiments anciens afin qu'ils soient plus performants au niveau énergétique. Là aussi, le BIM offre un ensemble d'outils collaboratifs et participatifs pour aider à la prise de décision et permettre un meilleur suivi des chantiers. Afin de pouvoir utiliser pleinement ces nouveaux outils, il est indispensable d'avoir à disposition des maquettes numériques 3D du bâtiment ce qui n'est pas le cas pour des bâtiments anciens à rénover.

Différentes méthodes existent pour générer une maquette numérique 3D d'un bâtiment existant. Après une analyse approfondie (cf. section 1.2), notre choix s'est porté sur la combinaison de plusieurs méthodes : l'utilisation de plans scannés 2D pour générer la maquette numérique qui pourra être complétée par des données telles que les images de façades. Ce choix est justifié au travers notamment des limites toujours présentes lors de l'utilisation de plans papiers.

1.4.1 Limites actuelles

1.4.1.1 L'absence de solution complète pour la conversion

Le processus de conversion d'un plan papier en maquette numérique 3D fait intervenir des domaines de recherche et des compétences métiers différentes.

Tout d'abord, la première phase consiste à analyser l'image du plan scanné. Cela nécessite d'avoir recours à des méthodes de traitements d'image et de reconnaissance de formes performantes afin d'extraire dans un premier temps le texte puis l'interpréter grâce à des logiciels de reconnaissance de caractères (OCR). Ensuite, des formes primitives géométriques sont extraites de l'image grâce à différentes techniques de vectorisation.

Lors de la phase de reconstruction de la maquette numérique, le système doit être capable d'interpréter des formes géométriques pour les convertir en éléments du bâtiment. Il faut donc générer un ensemble de règles logiques à la fois topologiques, géométriques et sémantiques pour créer une maquette numérique cohérente du bâtiment.

La maquette numérique générée doit ensuite être validée et satisfaire des contraintes spécifiques en fonction des besoins. Pour cela, des compétences métiers sur le bâtiment sont indispensables afin de définir et d'appliquer des règles logiques et adéquates permettant de valider par exemple l'accès au chemin d'évacuation. Lors de la phase d'export, une connaissance des standards est requise pour faciliter cette phase de passage d'un modèle interne de données à un format conforme avec les standards du BIM.

Cette diversité de domaines de recherche permet d'avoir des solutions performantes concernant une étape de la conversion mais aucune ne peut actuellement traiter l'ensemble du processus : analyse d'image, création d'une maquette numérique cohérente et export 3D. Cette intégration est rendue difficile par l'hétérogénéité des solutions et des formats utilisés. En effet, beaucoup de travaux font le choix de définir un format de données interne afin de ne pas être dépendant d'un seul format de fichier et de ses différentes modifications. Cela est notamment le cas lors de l'étape de validation d'une maquette numérique où l'information nécessaire à la vérification est extraite de la maquette numérique, le modèle interne étant ensuite complété par des données non présentes initialement dans la maquette numérique.

1.4.1.2 Le manque d'information sur le plan architectural

Lors de la phase de reconnaissance des éléments du bâtiment à partir du plan, un certain nombre ne sont pas identifiés automatiquement. Les escaliers par exemple sont des éléments difficiles à extraire du plan en raison de leur représentation qui varie en fonction du type d'escalier et de sa disposition. Le plus souvent, leur forme générale est représentée sur le plan mais elle est insuffisante pour générer automatiquement l'escalier en 3D. En effet, des indications indispensables à la reconstruction telles que la hauteur ou le nombre de marches ne sont pas indiquées. Dans la plupart des cas, l'empreinte générale de l'escalier est reconnue sans générer par la suite sa forme 3D.

Il en est de même pour la génération automatique des toits. La forme du toit est parfois représentée sur le plan mais reste difficile à extraire et à isoler de l'ensemble des autres primitives géométriques. Cependant, des approches se basant sur des photographies aériennes permettent de reconstruire les toits grâce à la forme du bâtiment.

Comme évoqué dans la section 1.3.2.2, l'interprétation des symboles dans un plan est une tâche difficile et peu d'éléments du mobilier parfois présents sur le plan sont automatiquement reconnus et traités durant la conversion. Or, ces éléments apportent de l'information sémantique intéressante pour déterminer la fonction des pièces (par exemple une baignoire indique que la pièce est une salle de bains) mais peuvent aussi créer du bruit et des confusions en générant des éléments de structure inexistants.

Les maquettes numériques générées à partir d'un plan 2D scanné sont généralement incomplètes. Tout d'abord, elles contiennent peu d'information sémantique. Sur cette question, les travaux de l'état de l'art se focalisent sur le nom des pièces (reconnu grâce au texte) qui permet d'en déduire la fonction. Aucune information concernant notamment les

matériaux de construction utilisés n'est disponible. Enfin, toute l'information concernant la troisième dimension (hauteur) n'est pas non plus disponible sur le plan. Les approches actuelles permettent de générer des maquettes dans lesquelles, la hauteur des murs et des ouvrants est fixé arbitrairement.

En résumé, les principales limites à l'utilisation de plans 2D scannés sont :

1. Le manque d'information 3D sur le plan.
2. L'absence d'un processus complet de reconstruction prenant en compte les composantes géométriques, topologiques et sémantiques.
3. La compatibilité des maquettes générées avec des outils BIM.
4. La difficulté de concevoir une approche générique prenant en compte la diversité de représentations.

1.4.2 Orientation des travaux

Dans cette section, nous présentons l'orientation de nos travaux afin d'apporter des éléments de réponses aux limites décrites ci-dessus. Nous proposons pour cela trois pistes :

1. Utiliser des sources de données complémentaires pour combler le manque d'information.
2. Intégrer les utilisateurs dans le processus de conversion pour limiter les erreurs et incohérences sur la maquette finale.
3. Choisir un format de données adapté pour limiter les problèmes d'interopérabilité.

Ces trois propositions sont représentées dans la figure 1.12 schématisant notre orientation.

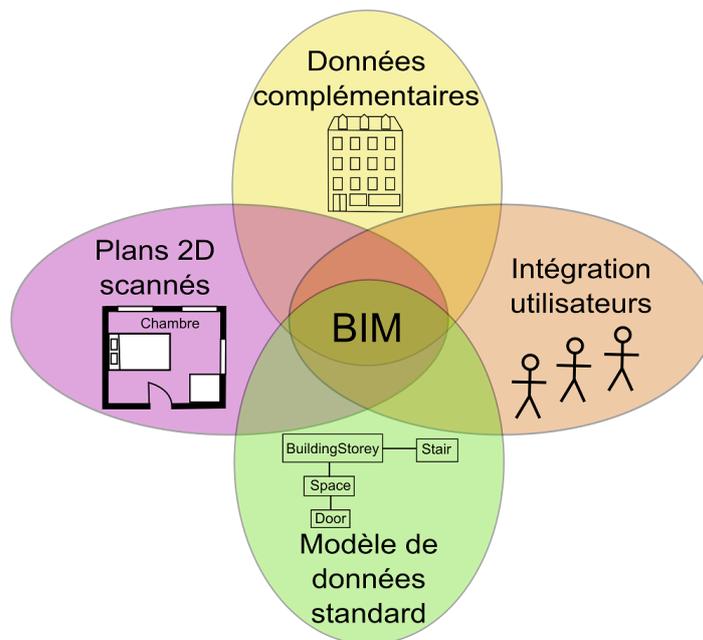


FIGURE 1.12 – Cartographie de l'orientation de nos travaux

1.4.2.1 Utiliser des sources de données complémentaires

Afin d'apporter des éléments de réponse au manque d'information sur le plan 2D, nous proposons d'utiliser des sources de données complémentaires pour compléter la maquette numérique. Des méthodes existantes proposent déjà d'utiliser différentes vues 2D d'un même bâtiment pour en reconstruire une forme 3D [103, 104]. C'est pourquoi nous proposons d'utiliser d'autres sources de données pour définir les hauteurs, soit selon des paramètres standards soit par des traitements supplémentaires.

Par exemple, les images de façade apportent un ensemble d'informations utiles pour compléter la maquette numérique. Ok et al. [35] utilisent un ensemble d'images de façade pour reconstruire une image complète de la façade afin de la segmenter pour reconnaître automatiquement les différents éléments de la façade (fenêtres, portes, balcons, toits).

Ces informations sont riches car elles donnent notamment des indications sur la troisième dimension en déterminant la hauteur du mur, des ouvrants mais aussi leurs positions relatives dans le mur. Cela pourrait également permettre de récupérer de l'information sémantique concernant le type de matériaux utilisés lors de la construction du bâtiment mais aussi de vérifier que les éléments du plans se retrouvent bien dans l'image de façade et vice-versa.

On pourrait aussi compléter la maquette numérique en utilisant des photographies aériennes du bâtiment. Cela permettrait de valider la forme extérieure mais surtout de reconstruire automatiquement le toit du bâtiment [105]. Certaines données en accès payant donnent également des informations sur la géométrie ou la hauteur des bâtiments comme *la BD Topo classe bati*²⁰, la base de données topographiques des bâtiments de l'IGN, sous réserve de souscrire un abonnement. Cependant, aucune information sur les dimensions des ouvrants et leur positionnement relatif n'est disponible avec cette source d'information.

1.4.2.2 Intégrer les utilisateurs

Un des objectifs du BIM est de faciliter l'échange et le travail collaboratif entre les acteurs d'un même projet. C'est pourquoi intégrer les utilisateurs dans le processus de conversion d'un plan 2D en BIM semble une approche intéressante. De plus, il apparaît difficile de concevoir un système automatique suffisamment générique pour l'ensemble des représentations graphiques existantes.

Un axe de recherche possible est la conception d'un outil semi-automatique pour la reconstruction 3D. Ce système a pour objectif de guider l'utilisateur afin de corriger la maquette numérique. A notre connaissance, il n'existe actuellement pas de système permettant d'interagir avec l'utilisateur durant la phase de reconnaissance et de reconstruction.

Une autre approche qui semble prometteuse est d'utiliser l'aspect collaboratif du BIM afin d'aider à la correction des erreurs commises pendant la conversion. Un tel système permet à plusieurs acteurs différents du bâtiment d'apporter des corrections suivant leurs compétences principales. Ces corrections peuvent ensuite être enregistrées afin d'être analysées pour améliorer le système de correction. De nombreuses études ont été réalisées

20. <http://professionnels.ign.fr/bdtopo>

dans le domaine du BIM et des outils collaboratifs et plus précisément sur les besoins des utilisateurs [106, 107]. Des outils existent actuellement afin d'améliorer les échanges de données et la collaboration entre acteurs mais ces derniers reposent généralement sur un format de données unique [108, 109].

1.4.2.3 Choisir un format de données adapté

Le format de données utilisé est aussi une question cruciale. Beaucoup de travaux font le choix de travailler avec des graphes [110, 111, 112, 113]. Par rapport aux outils proposés par le BIM et notamment l'IFC, un graphe a l'avantage d'être plus flexible et plus facile à implémenter. Il est défini par un ensemble de nœuds et d'arcs où un nœud représente un élément du bâtiment et un arc relie deux éléments entre eux.

Les trois composantes indispensables à la modélisation du bâtiment sont présentes : la géométrie est définie par les coordonnées des nœuds, la topologie se déduit par les arcs liant deux nœuds et la sémantique est exprimée grâce à des attributs attachés à chaque nœud. Après la phase de reconnaissance, des corrections peuvent être directement effectuées sur le graphe. Celui-ci peut ensuite être exporté dans la plupart des formats existants. L'avantage certain est que les processus développés ne sont pas dépendants d'un standard et donc des modifications ou mises à jour qu'il pourrait subir. Dans un tel cas, un changement du standard entraîne seulement une modification du processus réalisant la conversion du graphe vers le standard en question.

Cependant, le BIM se veut être un modèle qui permet de décrire le bâtiment pendant tout son cycle de vie. Il ne contient pas seulement des données sur la composition interne du bâtiment mais en permet un véritable suivi. La représentation sous forme de graphe, même si elle présente de nombreux avantages, peut donc se révéler limitée en regard de ces objectifs. Et il est sans doute préférable de se rapprocher de formats plus riches, même si cela peut induire une complexité supplémentaire. En particulier, le format IFC, reconnu comme un standard international, peut constituer une base pertinente. C'est un format largement utilisé, qui se prête à des adaptations et simplifications (exemple : extraction d'un sous-ensemble) en vue d'une application spécifique [114].

Dans les chapitres suivants, une description détaillée de nos travaux se basant sur ces pistes d'amélioration est réalisée. Le chapitre 2 présente la méthodologie et les tests mis en place pour la conception d'une méthodologie de conversion automatique d'un plan 2D scanné en une maquette numérique. Dans ce chapitre, les méthodes pour extraire à partir de l'image originale les primitives géométriques afin de reconstruire les éléments du bâtiment puis la maquette numérique sont détaillées. Ces méthodes ont permis le développement informatique d'un prototype afin de convertir automatiquement une image de plan 2D scanné en une maquette numérique 3D. Ses performances sont testées grâce à une base de données de 90 plans et les méthodes d'évaluation des résultats sont également détaillées.

Chapitre 2

Génération automatique d'une maquette numérique 3D à partir d'un plan 2D scanné

Sommaire

2.1	Introduction	36
2.2	Extraction des éléments caractéristiques du plan	37
2.2.1	Prétraitements	37
2.2.2	Extraction du texte	38
2.2.3	Extraction d'éléments graphiques	40
2.3	Reconstitution des éléments du bâtiment	42
2.3.1	Identification des murs	42
2.3.1.1	Méthodes existantes	43
2.3.1.2	Définitions et propriétés d'un mur	44
2.3.2	Ouvrants	46
2.4	Reconstruction de la maquette numérique	47
2.4.1	Forme extérieure du bâtiment	48
2.4.2	Reconstruction intérieure	49
2.4.3	Recherche d'espaces	51
2.5	Export 3D	53
2.5.1	Caractéristiques du modèle de données interne	54
2.5.2	Le modèle IfcLight	55
2.5.2.1	Présentation générale	55
2.5.2.2	Géométrie	56
2.5.2.3	Topologie	56
2.5.2.4	Sémantique	57
2.6	Évaluation de performance	59
2.6.1	Développement d'un prototype	59
2.6.2	Présentation des données tests	59
2.6.3	Méthodes d'évaluation	61
2.6.3.1	Évaluation au niveau des pixels	61
2.6.3.2	Évaluation du bâtiment	64

2.6.4	Résultats	65
2.6.4.1	Évaluation au niveau des pixels	65
2.6.4.2	Évaluation du bâtiment	67
2.7	Conclusion - Discussion	68

2.1 Introduction

Le processus de conversion d'un plan 2D scanné en un modèle BIM 3D comporte différentes étapes nécessaires à l'élaboration d'une maquette numérique contenant une description détaillée des trois principales composantes d'un bâtiment : la géométrie, la topologie et la sémantique.

L'approche ascendante mise en place part de l'élément le plus fin pour progressivement reconstruire la maquette numérique (approche bottom-up). Ainsi, la première étape consiste à décomposer l'image en éléments simples puis à les assembler entre eux afin de définir des éléments de plus haut niveau jusqu'à composer un ensemble cohérent, ici une maquette numérique complète et valide.

Afin de réaliser la conversion d'une image de plan scanné 2D en maquette numérique 3D décrivant avec précision les trois composantes du bâtiment, quatre étapes principales ont été identifiées :

1. Prétraitements sur l'image afin de la nettoyer et d'en extraire les éléments caractéristiques du plan tels que du texte ou des éléments graphiques qui sont des entités vectorielles issues de l'image.
2. Reconnaissance des éléments du bâtiment tels que des murs ou des ouvrants à partir des éléments caractéristiques vectoriels définis précédemment.
3. Reconstruction de la maquette numérique afin de générer un ensemble cohérent composé des différents éléments du bâtiment, respectant des contraintes géométriques, topologiques et sémantiques.
4. Export de la maquette numérique dans un format compatible avec le BIM.

Au cours des étapes 2 et 3, des vérifications et validations sont effectuées afin d'extraire et d'interpréter correctement chaque élément. Le schéma de la figure 2.1 présente l'approche adoptée en décrivant l'enchaînement des étapes ainsi que les éléments spécifiques qui sont créés au fur et à mesure de la conversion.

Dans ce chapitre, la méthodologie développée pour convertir automatiquement une image de plan en une maquette numérique 3D est présentée. Cette approche de type *bottom-up* est basée notamment sur des méthodes existantes et performantes de l'état de l'art.

Le format de données interne utilisé est également présenté en détails. Il est défini ici comme une déclinaison du standard IFC. Il consiste en un extrait simplifié de l'IFC afin de faciliter les traitements et l'export 3D. Enfin des résultats de tests réalisés sur une base de données de 90 plans sont présentés grâce aux différentes méthodes d'évaluation mises en place.

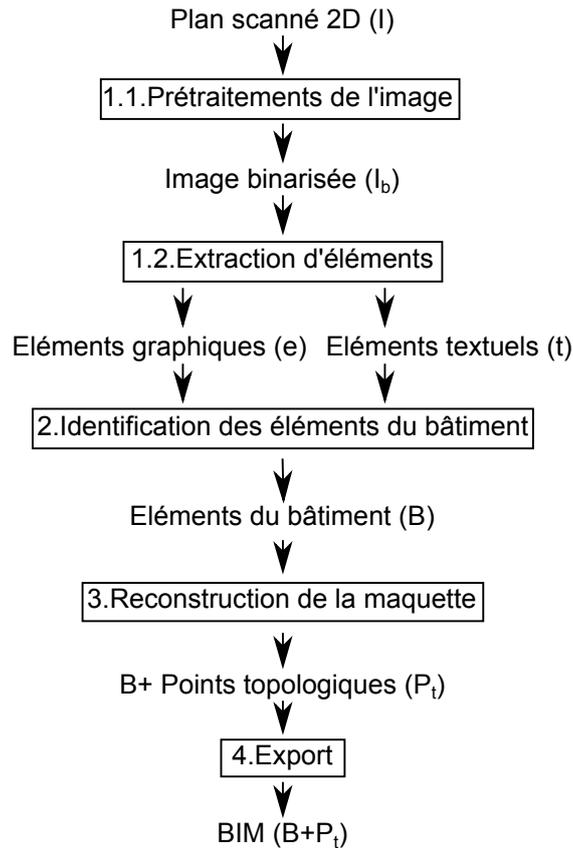


FIGURE 2.1 – Schéma général de la reconstitution d'une maquette numérique à partir d'une image de plan scanné avec I : image originale, I_b : image binarisée, e : élément graphique, t : élément textuel, B : élément du bâtiment et P_t : point topologique.

2.2 Extraction des éléments caractéristiques du plan

Cette partie présente la première étape consistant à préparer et nettoyer l'image originale du plan afin d'en extraire des éléments caractéristiques tels que le texte et les éléments graphiques.

Nous faisons également l'hypothèse suivante. Un mur est représenté par une zone homogène de pixels de couleur autre que blanc (le plus souvent noir). Nous excluons donc les plans où les murs sont représentés par des hachures ou par un fond blanc. Cette hypothèse réduit l'ensemble de plans que l'on peut traiter mais nous aborderons plus en détails l'extension de ces méthodes à des plans de sources et de représentations différentes dans le chapitre 4.

2.2.1 Prétraitements

Différents bruits dans l'image, causés principalement par la qualité du plan original et éventuellement par celle du scanner optique utilisé, peuvent entraîner des difficultés lors de la reconnaissance des éléments.

Le plan ne contient pas seulement la représentation du bâtiment et de ses différents composants. D'autres éléments sont présents dans l'image qu'il vaut mieux supprimer

avant d'appliquer les méthodes de reconnaissance. Il arrive qu'un cartouche soit dessiné sur le plan dans lequel sont portées des indications sur le bâtiment (date de construction, date de mise à jour du plan, échelle, logo, photo etc.). Ces éléments sont intéressants car ils donnent des éléments de contexte sur le bâtiment mais ils sont inutiles lors de la phase de reconnaissance et peuvent même entraîner des confusions.

Par exemple, si une photo ou un logo est présent sur l'image, ils peuvent être considérés comme des éléments du bâtiment et convertis en murs ou autres. Afin d'éviter cela, l'image est rognée sans modification de ses proportions pour supprimer les éventuels photos ou cartouches. Actuellement ce pré-traitement de nettoyage de l'image en supprimant les éléments inutiles est réalisé manuellement en rognant l'image dans un logiciel de traitement d'image pour l'édition et la modification. C'est en effet une étape difficile à généraliser en raison de la variabilité des plans et des cartouches. Les éléments tels que les traits de côte ou le mobilier de jardin ne sont pas supprimés.

La première étape automatisée consiste à binariser l'image afin de faciliter les traitements futurs. Une binarisation globale est appliquée, c'est à dire qu'un seuil unique est déterminé qui sera appliqué à l'ensemble des pixels de l'image. Cette binarisation semble en effet être la plus adaptée en raison de l'homogénéité des plans et des conditions d'acquisition. L'image binarisée est notée I_b . Le seuil de binarisation est choisi automatiquement par une analyse des pixels de l'image.

Le seuil de binarisation est défini préalablement et il est commun à tous les points de l'image. Afin de le déterminer automatiquement, on calcule l'histogramme associé à l'image grâce aux valeurs des différents pixels puis on détermine ensuite la valeur permettant de séparer l'histogramme de valeurs en deux classes, ce seuil est utilisé lors de la binarisation. Un calcul adaptatif est réalisé ici en fonction des caractéristiques de l'image.

A chaque pixel de l'image, on associe un ensemble de coordonnées (x, y) où x représente la position du pixel en abscisse et y en ordonnée. La valeur de chaque pixel v est alors directement accessible grâce à ses coordonnées et une lecture de l'image. Tous les éléments définis dans la suite de ce chapitre sont repérés dans l'image grâce à un couple de coordonnées. Un point (P) représente alors la plus petite entité que l'on peut extraire à partir de l'image originale et il est défini par :

$$P = \begin{cases} (x, y, v) \\ v = I_b(x, y) \end{cases} \quad (2.1)$$

2.2.2 Extraction du texte

Une fois l'image binarisée, l'étape suivante consiste à extraire de l'image originale des morceaux correspondant aux éléments textuels pour créer une nouvelle image. Il reste alors dans l'image originale seulement les éléments graphiques. Ces deux images sont ensuite traitées séparément. Afin de réaliser ce traitement, nous utilisons des fonctions de recherche de texte dans une image d'un projet open-source développé par une équipe du Loria (France) : *Qgar*¹. Ce projet d'analyse de document, achevé en novembre 2008, propose de nombreuses fonctions performantes d'analyse d'image bien que ce projet ne soit plus maintenu.

1. <http://www.qgar.org/>

L'algorithme proposé pour extraire le texte d'une image présente l'avantage d'être indépendant de la police utilisée, de la taille et de l'orientation des caractères. Bien qu'une étude réalisée [76] montre que la fiabilité du résultat est fortement liée à la qualité de l'image originale, les résultats obtenus sont acceptables car ils permettent, dans la plupart des cas, d'extraire toute l'information textuelle en générant peu de fausses détections. Cette méthode est utile dans le domaine d'analyse de plans architecturaux où les textes peuvent avoir différentes orientations et surtout chevaucher des éléments graphiques du plan. C'est pourquoi il est nécessaire de retirer préalablement le texte du plan afin d'éviter toutes confusions.

Le texte est une source d'information importante lors de la reconstruction d'une maquette numérique. Tout d'abord, le nom des pièces donne des indications sur la fonction de la pièce et sur le mobilier que l'on peut y trouver ce qui constitue une aide pour orienter les recherches de symboles. Par exemple, dans une salle de bains on va plutôt rechercher un bac de douche ou une baignoire et dans une chambre un lit. En outre, l'aire de chaque pièce peut être indiquée sur le plan. Cela est un bon moyen de vérification afin de s'assurer que l'aire estimée à partir de la maquette numérique est équivalente à celle du plan original.

Lors de l'extraction du texte de l'image, une nouvelle image est créée qui contient les caractères reconnus dans le plan. De plus, il est possible de récupérer pour chaque ensemble de caractères : la position et les dimensions de la *bounding box* ou boîte englobante correspondante. Cette boîte englobante a pour forme géométrique un rectangle et elle est définie par sa diagonale. Un élément texte, t , sera alors noté :

$$t = \{P_1, P_2, string\} \quad (2.2)$$

P_1 et P_2 sont les deux points de la diagonale de la boîte englobante et *string* (chaîne de caractères) est l'ensemble des caractères reconnus pour l'élément texte. *String* peut avoir plusieurs formes : un extrait de l'image originale contenant les caractères reconnus sous forme de pixels ou une chaîne de caractères. Des traitements supplémentaires sont alors nécessaires dans le deuxième cas pour analyser les caractères et identifier le mot.

Des techniques d'OCR (Reconnaissance Optique de Caractères) sont généralement utilisées ou alors un opérateur peut renseigner le texte contenu dans chaque boîte englobante. Dans certains cas, les mots reconnus sont validés grâce à un dictionnaire de mots usuels rencontrés dans les représentations de plan (chambre, cuisine par exemple) [115]. Le dictionnaire doit par contre être exhaustif et contenir notamment les abréviations fréquemment utilisées dans le plan telles que "Ch." pour chambre ainsi que les variations dues au langage utilisé.

La figure 2.2 présente un exemple de résultat de l'extraction de texte à partir d'une image de plan. Tous les caractères sont bien reconnus. Par contre, des éléments n'étant pas des éléments du texte (le bac de douche, les deux vasques et la chasse d'eau des toilettes) sont pourtant identifiés comme du texte. Ces quelques erreurs ne seront pas déterminantes pour la suite car seuls des éléments du mobilier et non des éléments architecturaux du bâtiment sont mal identifiés.

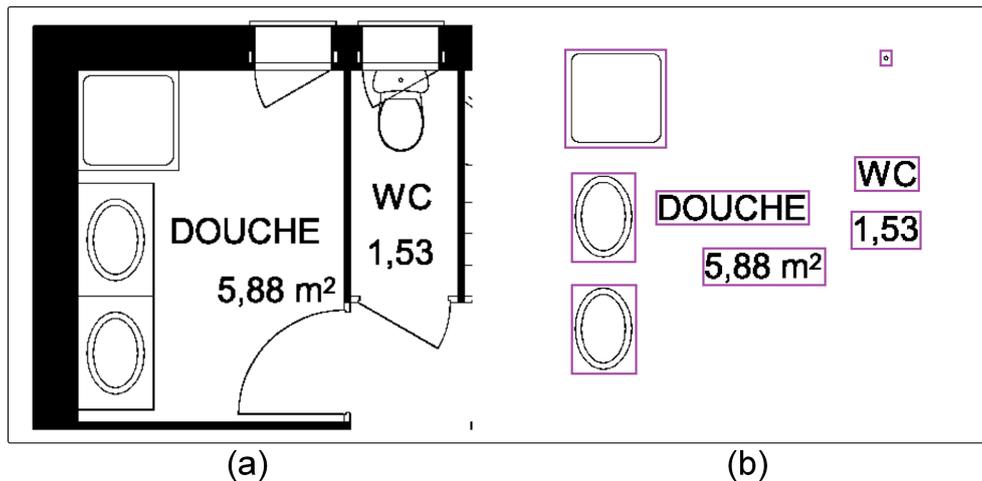


FIGURE 2.2 – Extraction du texte d’une image. (a) l’image originale, (b) l’image contenant les éléments textuels. Les boîtes englobantes autour de chaque élément texte sont représentées en violet. Sur cette image, 8 ont été identifiées.

2.2.3 Extraction d’éléments graphiques

Une fois le texte extrait de l’image originale, l’image résultante contient alors l’ensemble des éléments graphiques du plan (cf. figure 2.3). Parmi l’état de l’art, un grand nombre de méthodes de reconnaissance de forme développées en traitement d’images permettent d’identifier des primitives géométriques telles que des lignes, des segments, des cercles, etc. Dans un premier temps, nous allons extraire grâce à ces méthodes les éléments graphiques de l’image. Les formes géométriques recherchées sont des segments et des arcs de cercle, le reste est supprimé de l’image. Par la suite, ces éléments graphiques sont associés suivant un ensemble de règles logiques afin de reconstituer les éléments caractéristiques du plan.

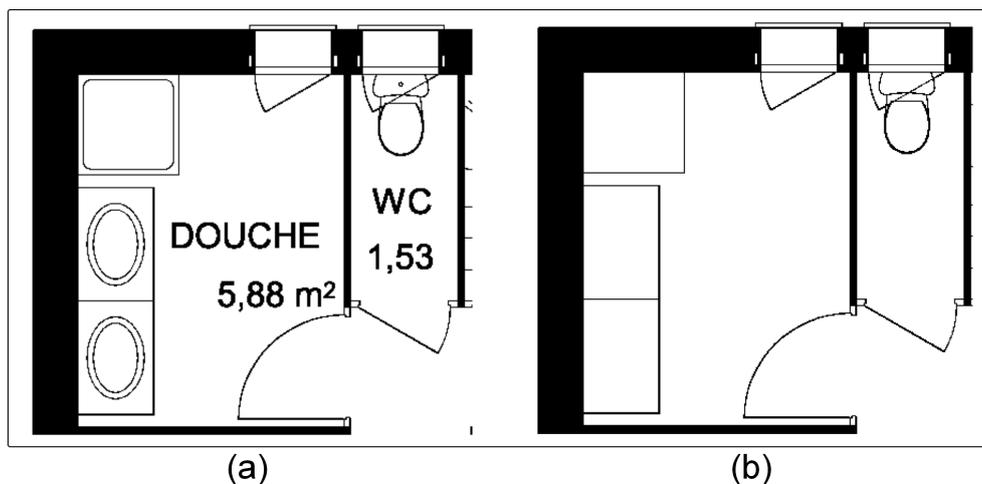


FIGURE 2.3 – Extraction des éléments graphiques d’une image. (a) l’image originale binaurisée, (b) l’image contenant les éléments graphiques sous forme de pixels après suppression des éléments textuels.

Une primitive géométrique notée e est définie par la formule suivante :

$$e = \{P_i\}_{i=2..n} \quad (2.3)$$

Un élément graphique est constitué par un ensemble de points dont le nombre varie en fonction de la géométrie de l'élément. Ainsi, e est seulement définie par une information de type géométrique sans topologie ou sémantique. Deux formes géométriques élémentaires distinctes sont recherchées :

1. Les segments définis par deux points de l'image.
2. Les arcs de cercle définis par son centre et son rayon.

Afin de limiter le nombre de segments détectés dans l'image, la recherche des segments et des arcs est réalisée grâce à la méthode de Hough [116] qui a l'avantage de générer un ensemble de segments et non des polygones constituées de segments. La méthode générale permet d'extraire d'une image l'ensemble des droites, mais d'autres formes telles que des segments et des cercles peuvent également être recherchées.

Nous utilisons pour cela la bibliothèque OpenCV² qui, pour une image donnée, renvoie l'ensemble des formes géométriques en spécifiant sa géométrie et sa position dans l'image. Pour la recherche des arcs, nous utilisons la fonction d'identification de cercles en diminuant le nombre de points nécessaires devant être présents sur le cercle. C'est grâce à cet ensemble d'arcs de cercle et de segments que les éléments caractéristiques du bâtiment sont identifiés.

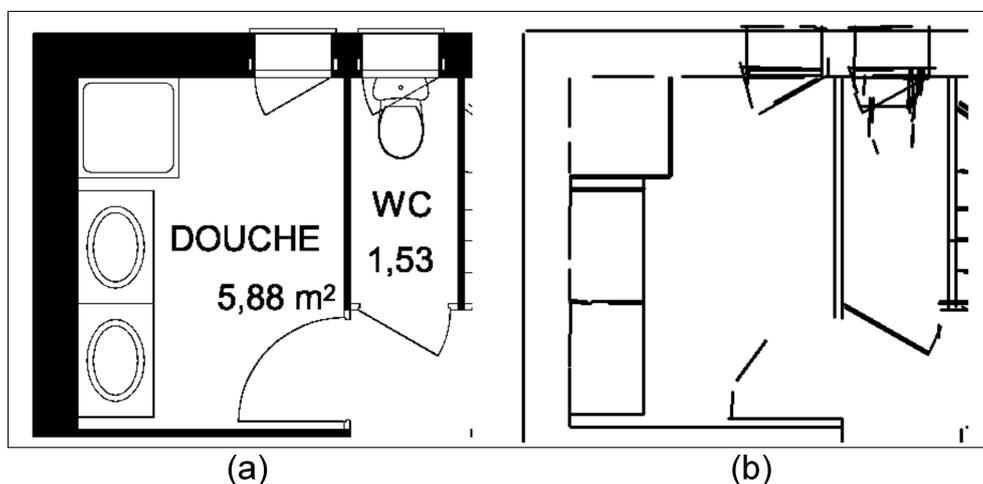


FIGURE 2.4 – Résultats de l'extraction de segments. (a) l'image originale, (b) segments extraits de l'image à partir d'une transformée de Hough.

La figure 2.4 présente un exemple de segments extraits de l'image. Tous les détails de l'image originale sont identifiés et convertis en segments. Cependant, des artefacts sont présents. Par exemple, les arcs de cercles sont en partie reconnus par des segments et certains objets comme le mobilier sont identifiés par un nombre important de petits segments. Ponctuellement, plusieurs segments sont identifiés pour un même détail. C'est pourquoi, il est nécessaire de filtrer cet ensemble de segments afin de ne conserver que

2. <http://opencv.org/>

ceux permettant de reconstruire des éléments caractéristiques du bâtiment.

Le graphique 2.5 représente pour chaque segment identifié dans la figure 2.4 le couple (θ, r) avec θ , l'angle orienté du segment exprimé en degrés et r , la longueur du segment en pixels. Une grande majorité de segments sont verticaux ou horizontaux. De plus, un nombre non négligeable de segments a une longueur inférieure à une trentaine de pixels, ils peuvent alors être considérés comme des artefacts.

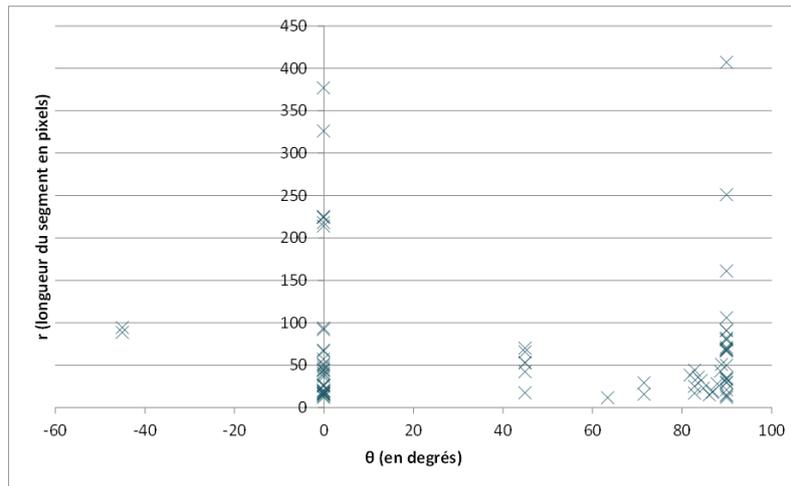


FIGURE 2.5 – Graphique représentant le couple (θ, r) pour chaque segment identifié dans la figure 2.4, θ est exprimé en degrés et r en pixels.

2.3 Reconstitution des éléments du bâtiment

Grâce à l'extraction des primitives géométriques e de l'image originale telles que les segments ou les arcs de cercle et des éléments textuels t , les éléments caractéristiques du plan sont ensuite reconnus. Ces éléments sont principalement des murs et des ouvrants et constituent les entités élémentaires à la reconstruction structurelle du bâtiment. Un élément d'un bâtiment est noté B et il est défini de la façon suivante :

$$B = \left\{ \{e_i\}_{i=2..n}, \{t_j\}_{j=0..p}, \{B_k\}_{k=0..q} \right\} \quad (2.4)$$

Un élément du bâtiment est constitué par un ensemble de n éléments graphiques, de p textes et de q éléments du bâtiment car il peut éventuellement contenir d'autres éléments du bâtiment notés B_k . Dans cette partie, nous présentons deux types d'éléments : les murs B_w et les ouvrants B_o .

2.3.1 Identification des murs

La reconnaissance des murs est un sujet important dans l'analyse de documents architecturaux car ils constituent généralement la forme principale du bâtiment. Le but est alors d'identifier l'ensemble des murs afin de pouvoir déterminer la forme extérieure du bâtiment qui servira de référence pour l'identification des autres éléments (murs intérieurs et ouvrants).

2.3.1.1 Méthodes existantes

L'état de l'art réalisé sur l'identification de murs à partir d'une image de plan architectural a conduit à l'identification de trois principales méthodes. Les deux premières méthodes utilisent des primitives géométriques pour reconstruire le bâtiment alors que la troisième effectue directement une reconnaissance de motifs particuliers dans l'image. Les deux premières sont similaires et se basent sur une extraction préalable de segments pour reconstruire les murs. Pour la troisième méthode, une approche autour de la segmentation d'image a été développée.

La première méthode est principalement basée sur une extraction de contours dans l'image [64]. L'hypothèse principale est que l'épaisseur du contour est représentative des éléments contenus : contour épais pour les murs et fin pour les symboles. Plusieurs images sont alors créées suivant l'épaisseur des lignes (petite, moyenne et grande) regroupant chacune les contours correspondants.

Les contours détectés dans l'image contenant les lignes de murs définissent des polygones considérés comme des murs. Afin de combler les écarts entre les polygones, pour corriger éventuellement la composante géométrique, d'autres éléments sont recherchés tels que des ouvrants. Deux murs sont regroupés quand ils sont séparés par un ouvrant.

La deuxième méthode est basée sur la détection de lignes grâce à une vectorisation de l'image. L'hypothèse appliquée ici est qu'un mur est toujours représenté par deux segments de même longueur et parallèles. L'ensemble des segments préalablement détectés permet d'identifier en trois étapes les murs de l'image [63]. Premièrement, les lignes parallèles entre elles et proches en distance sont sélectionnées comme étant des murs potentiels. Ensuite, selon la texture entre ces deux lignes le mur est confirmé puis connecté avec ses murs voisins afin de générer l'ensemble des murs du plan.

La troisième méthode identifie les murs grâce à une approche de segmentation d'image au niveau des pixels en utilisant des motifs [117, 65]. L'image est découpée en motifs correspondants à de petites zones de l'image et une classification est appliquée afin d'assigner à chaque motif une étiquette à partir d'un vocabulaire préalablement appris par le système et la probabilité pour un motif d'appartenir à chaque classe possible.

Cette méthode est robuste pour étiqueter chaque pixel de l'image mais aucun traitement n'est par la suite appliqué pour reconstruire une maquette numérique complète et cohérente. De plus, une base d'apprentissage est nécessaire pour réaliser la classification.

L'approche retenue est issue de la deuxième méthode. Elle nous semble en effet la plus adaptée car les propriétés géométriques extraites sont en accord avec celles de l'enveloppe du bâtiment. La dernière méthode permet d'étiqueter chaque pixel mais il est ensuite difficile de reconstruire des murs cohérents car des traitements complémentaires doivent être appliqués pour identifier des groupes de pixels appartenant à un même mur. C'est une méthode de segmentation d'image qui est finalement plus proche d'un prétraitement pour extraire et identifier des motifs élémentaires que d'une reconstruction d'éléments du bâtiment.

Dans la première méthode, l'hypothèse que les éléments les plus épais représentent des murs et les autres des symboles est trop forte et ne pourra pas être facilement adaptée

avec des plans de diverses sources. Cependant, l'épaisseur des murs est un indicateur permettant partiellement de distinguer les murs intérieurs et extérieurs. Dans notre approche, les murs sont donc déterminés en analysant l'ensemble des segments de l'image.

2.3.1.2 Définitions et propriétés d'un mur

L'enjeu de cette étape est d'identifier dans l'ensemble de segments extraits précédemment ceux permettant de reconstruire des murs. La difficulté réside dans l'identification d'un maximum de murs tout en évitant la création d'éléments inexistantes en confondant par exemple les segments représentant des murs avec ceux représentant des éléments du toit ou du mobilier.

Certaines approches utilisent comme critère déterminant l'épaisseur en éliminant les éléments de faible épaisseur qui ne correspondraient pas à des murs [118] mais cette solution présente l'inconvénient de supprimer certains éléments qui sont des murs plus fins. Un mur dit *candidat* ou un segment de mur peut donc être défini de la façon suivante :

$$B_w = \begin{cases} \{e_1, e_2\} \\ e_{1_{shape}} = e_{2_{shape}} = segment \\ e_1 // e_2 \\ E_{min} < d(e_1, e_2) < E_{max} \\ L_{min} < l(e_1) < L_{max} \\ L_{min} < l(e_2) < L_{max} \end{cases} \quad (2.5)$$

Un mur est constitué de deux segments, e_1 et e_2 , qui ont pour propriétés d'être parallèles et distants d'une valeur comprise entre E_{min} et E_{max} . Ces deux valeurs ont été choisies en fonction des standards de construction concernant l'épaisseur des murs. Cependant, elles sont modifiables en fonction du type de bâtiment représenté, de ses caractéristiques et de la qualité de l'image. La longueur des segments doit être également proche et comprise entre deux valeurs de référence L_{min} et L_{max} .

La figure 2.6 illustre le cas d'un mur bien identifié représenté en vert et d'un mur candidat inexistant en rouge. Ces deux murs candidats respectent bien la définition donnée précédemment mais celui représenté en rouge n'est en réalité pas un mur mais un bord de la cabine de douche. Afin d'éviter la création de ces éléments inexistantes, des méthodes de validation des murs candidats ont donc été mises en place.

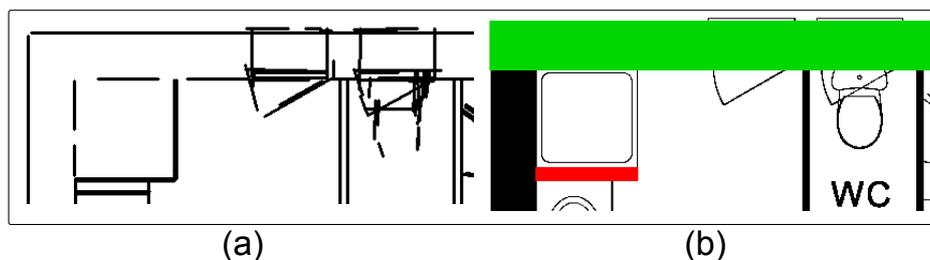


FIGURE 2.6 – Exemple d'identification de murs candidats à partir des segments extraits de l'image. (a) l'ensemble des segments, (b) image représentant deux murs candidats : en vert un mur candidat correctement identifié et en rouge un mur candidat inexistant.

CHAPITRE 2. GÉNÉRATION AUTOMATIQUE D'UNE MAQUETTE NUMÉRIQUE 3D À PARTIR D'UN PLAN 2D SCANNÉ

Afin de valider et de corriger les murs candidats, deux tests sont effectués. En utilisant l'hypothèse qu'un mur est représenté par une texture homogène, ici des pixels noirs, un test est réalisé sur la densité de pixels noirs du mur candidat dans l'image originale. Si ce seuil est supérieur à un quart de l'aire du mur candidat alors le mur est conservé. Ce seuil de densité bas a été fixé empiriquement afin de prendre en compte les murs constitués d'ouvrants qui eux sont souvent représentés par des rectangles à fond blanc. Cependant, ce test peut supprimer des murs étant seulement constitués d'un ouvrant.

Le deuxième test consiste à valider et corriger l'épaisseur de chaque mur. Les valeurs d'épaisseur sont automatiquement calculées à partir de l'ensemble des valeurs d'épaisseur de tous les murs du plan. Un processus automatique analyse l'ensemble des valeurs pour déterminer les valeurs des classes d'épaisseur.

Pour cela, l'histogramme des valeurs d'épaisseur est calculée (cf. figure 2.7), sur l'exemple on identifie clairement 3 classes d'épaisseur centrées en 7, 25 et 43. Ensuite, grâce à l'image originale, les épaisseurs de chaque mur sont corrigées et harmonisées en modifiant si besoin la position du mur. Les murs obtenus sont alors séparés en deux groupes : les murs extérieurs et les murs intérieurs. Les murs de la classe de plus faible épaisseur sont considérés comme intérieurs et ceux de la classe de plus forte épaisseur comme extérieurs. Pour la classe intermédiaire, des tests complémentaires sont effectués sur chaque mur de la classe pour déterminer si il est entouré d'autres murs ou pas.

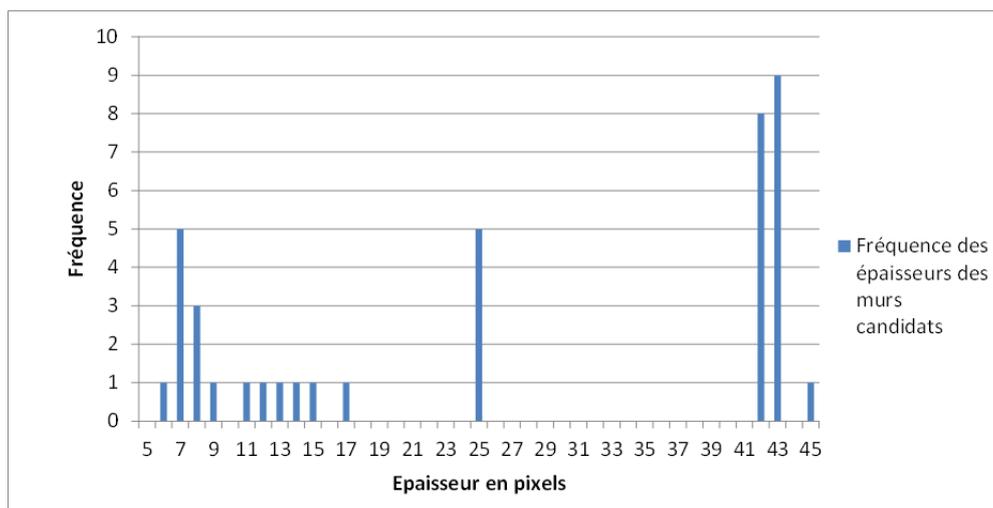


FIGURE 2.7 – Histogramme des valeurs d'épaisseur pour l'ensemble des murs candidats. 3 classes d'épaisseur sont identifiées qui auront comme valeurs en pixels : 7, 25 et 43.

La figure 2.8 représente le résultat des traitements décrits précédemment pour extraire à partir de l'ensemble de segments de la figure 2.4 les murs intérieurs représentés en bleu et ceux extérieurs représentés en rouge. On peut observer que le mur extérieur vertical de gauche a été reconnu en différents fragments et non intégralement. Cela s'explique en partie par la reconnaissance des segments qui sont identifiés de manière discontinue à cause des symboles du mobilier. Un mur intérieur horizontal en haut à droite est faux, il est en effet contenu dans un mur extérieur. Il est donc nécessaire de valider par la suite les différents éléments du bâtiment afin de reconstruire correctement l'ensemble des murs.

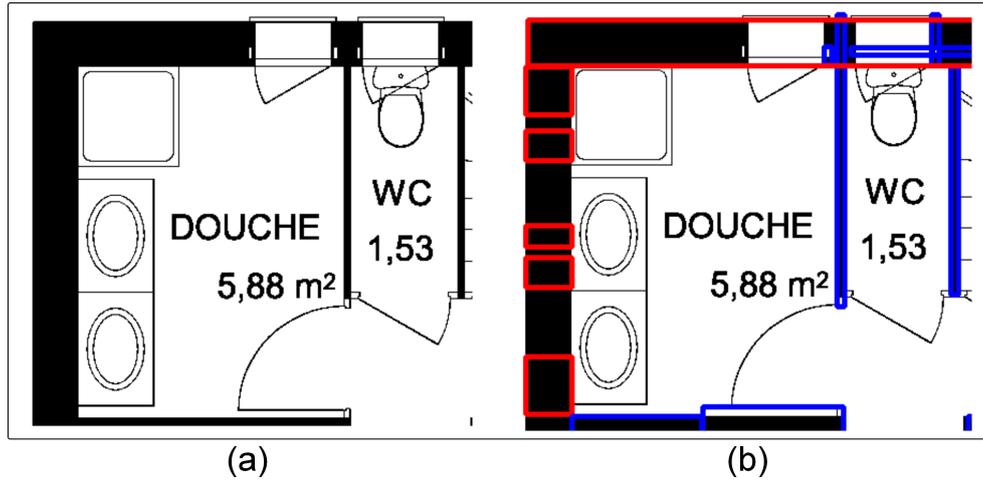


FIGURE 2.8 – Résultats de l'identification des murs candidats dans l'image originale. (a) l'image originale, (b) l'image contenant les murs candidats extérieurs représentés en rouge et ceux intérieurs en bleu.

2.3.2 Ouvrants

Comme pour les murs, les conventions de représentation d'un ouvrant diffèrent suivant le type de plan et la charte graphique utilisée. Cependant, dans la plupart des cas, un ouvrant est représenté par une forme géométrique distincte de la représentation du mur. Ainsi, un ouvrant peut être déterminé à partir de la définition des murs en recherchant des discontinuités dans l'image originale, connaissant la position des murs. Les deux règles suivantes sont appliquées : un ouvrant est inclus dans un unique mur et un ouvrant peut être une fenêtre ou une porte. Il est noté B_o et défini de la façon suivante :

$$B_o = \begin{cases} \{e_1, e_2, B_w, (e_3)\} \\ e_{1_{shape}} = e_{2_{shape}} = segment \\ e_{3_{shape}} = arc \\ e_1 \subset B_w \\ e_2 \subset B_w \\ |d(e_1, e_2) - d(B_{w_{e1}}, B_{w_{e2}})| < \epsilon \end{cases} \quad (2.6)$$

Avec e_1 et e_2 qui sont deux segments en intersection avec un mur unique B_w . La distance entre ces deux segments doit être similaire à l'épaisseur du mur B_w , c'est à dire que la différence entre les deux doit être inférieure à un seuil ϵ qui est lui inférieur à l'écart entre deux classes d'épaisseur. De plus, un ouvrant peut être éventuellement représenté par un symbole supplémentaire comme par exemple un arc de cercle qui est noté e_3 mais dont la présence est facultative.

Ainsi, à l'inverse des murs, les ouvrants ne peuvent pas être tous extraits directement à partir des primitives géométriques de l'image car il faut avoir préalablement identifié les murs. Si le mur associé à un ouvrant n'a pas été reconnu, il sera alors impossible de détecter l'ouvrant associé.

Une porte est parfois représentée par un arc de cercle mais cette règle n'est pas appliquée sur tous les plans, c'est pourquoi il est parfois difficile de faire la distinction automatique entre les portes et les fenêtres. Afin d'optimiser le processus, des règles sup-

plémentaires sont appliquées concernant notamment la largeur d'ouverture d'un ouvrant. Là aussi des standards de construction sur la géométrie sont disponibles et permettent de valider ou non la présence d'un ouvrant.

2.4 Reconstruction de la maquette numérique

La reconstruction de la maquette numérique se déroule en trois phases consécutives (cf. figure 2.9) en extrayant en priorité la forme extérieure du bâtiment pour se focaliser ensuite sur la reconstruction intérieure et terminer sur la recherche des espaces. Durant ce procédé, des ajustements sont apportés au fur et à mesure aux éléments en conservant les propriétés intrinsèques à chacun. Lorsqu'une étape est terminée, les éléments du bâtiment sont alors considérés comme figés et ne sont plus modifiés. Ainsi, au début de la phase consacrée aux éléments intérieurs, les éléments extérieurs du bâtiment (murs et ouvrants) sont validés et ne sont plus modifiés.

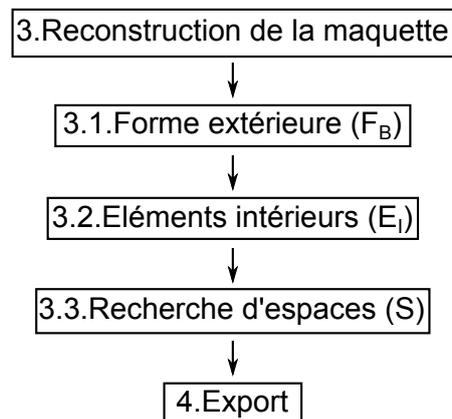


FIGURE 2.9 – Processus détaillé de la phase d'assemblage de la maquette numérique.

Afin de reconstruire une maquette cohérente, il est nécessaire d'identifier les liens entre les éléments du bâtiment. Plusieurs types de liens existent suivant les éléments impliqués et la configuration du plan :

1. L'inclusion : ce lien est principalement présent entre un mur et son ouvrant. En effet, un ouvrant doit être positionné à l'intérieur d'un mur.
2. Le contact : ce lien est utilisé entre deux murs quand ils sont en relation topologique. Grâce à ce lien, les deux murs sont ajustés correctement et la composante géométrique est bien définie.
3. Le chevauchement : ce lien apparaît quand deux éléments s'intersectent. Dans ce cas là, la géométrie du lien doit être corrigée pour devenir un lien d'inclusion ou de contact suivant les éléments impliqués.

Dans cette section, les trois étapes nécessaires à la reconstruction de la maquette numérique sont détaillées. Alors que les traitements précédents ont permis d'extraire une grande partie de l'information géométrique de l'image, cette étape est focalisée sur l'identification des liens topologiques et l'ajout d'information sémantique.

2.4.1 Forme extérieure du bâtiment

Afin de déterminer la forme extérieure du bâtiment, il est nécessaire de distinguer l'ensemble des murs candidats précédemment extraits en deux groupes : extérieurs et intérieurs. Les murs extérieurs sont ceux qui permettent de reconstruire l'enveloppe externe du bâtiment. Celle-ci est validée lorsqu'elle est constituée de murs formant un polygone fermé géométriquement et topologiquement. Lors de la reconstruction de la forme extérieure, on cherche principalement une cohérence des éléments qui implique une définition précise des liens topologiques.

L'idée générale est de rechercher des intersections entre murs extérieurs afin de créer des points topologiques et de rectifier la géométrie des murs pour que les liens soient de type contact. Un point topologique est défini de la façon suivante :

$$P_t = (B_{w1}, B_{w2}, (x, y)) \quad (2.7)$$

Un point topologique contient donc l'identifiant des deux murs en intersection B_{w1} et B_{w2} ainsi qu'une information de type géométrique : les coordonnées du point d'intersection entre les deux murs (x,y) qui sont utilisées par exemple lors de la recherche des espaces.

Nous faisons l'hypothèse que chaque mur appartenant à la forme extérieure du bâtiment est relié topologiquement sur ses deux extrémités à deux autres murs extérieurs afin que l'ensemble des murs extérieurs forme au final un unique polygone fermé. Ainsi, nous pouvons définir la forme extérieure d'un bâtiment grâce à la formule suivante où B_{wO} est un mur candidat extérieur et B_O est un ouvrant :

$$F_B = \left\{ \begin{array}{l} \{ \{ B_{wO_i} \}_{i=3..n}, \{ B_{O_j} \}_{j=1..p}, \{ P_{t_k} \}_{k=3..q} \} \\ \forall B_o \in \{ B_{O_j} \}_{j=1..p}, B_{oB_w} \in \{ B_{wO_i} \}_{i=3..n} \\ \forall B_w \in \{ B_{wO_i} \}_{i=3..n}, \exists!(P_{t1}, P_{t2}) \in \{ P_{t_k} \}_{k=3..q} \mid B_w \subset P_{t1} \text{ et } B_w \subset P_{t2} \end{array} \right. \quad (2.8)$$

Ainsi pour chaque mur B_w inclus dans la forme extérieure F_B , il existe exactement un unique couple de points topologiques (P_{t1}, P_{t2}) se rattachant à B_w . De même, si un ouvrant fait partie de F_B , le mur correspondant doit également être inclus dans F_B . Afin que la forme extérieure du bâtiment soit fermée, elle doit être obligatoirement constituée d'un minimum de trois murs et donc de trois points topologiques non alignés ainsi que d'au moins un accès vers l'extérieur, c'est à dire un ouvrant de type porte.

Une fois la forme extérieure du bâtiment achevée, les murs extérieurs n'étant reliés à aucun autre mur extérieur sont convertis en murs intérieurs en conservant leur épaisseur initiale, c'est le cas des murs porteurs par exemple. Ensuite, une recherche d'ouvrants est effectuée seulement dans les murs extérieurs restants afin de les reconnaître et de différencier les portes et les fenêtres.

Les ouvrants doivent aussi respecter les deux règles suivantes. Il est en effet impossible d'avoir deux ouvrants en intersection. Si c'est le cas, les deux ouvrants sont réunis afin de n'en former qu'un seul. De plus, la géométrie de l'ouvrant doit être compatible avec celle du mur de référence, l'ouvrant doit donc avoir un lien d'inclusion avec son mur associé pour être totalement inclus dans le mur.

A la fin de ce traitement, on obtient les éléments de la figure 2.10. Les murs sont représentés en rouge et les fenêtres en vert. Le cercle marron correspond à un point topologique. Sur cet extrait, on a donc bien reconnu les deux murs extérieurs et les ouvrants associés. De plus, la superposition de l'image originale avec les éléments reconnus montre la précision de la reconnaissance. Cette étape terminée, la reconstruction intérieure du bâtiment est initiée.

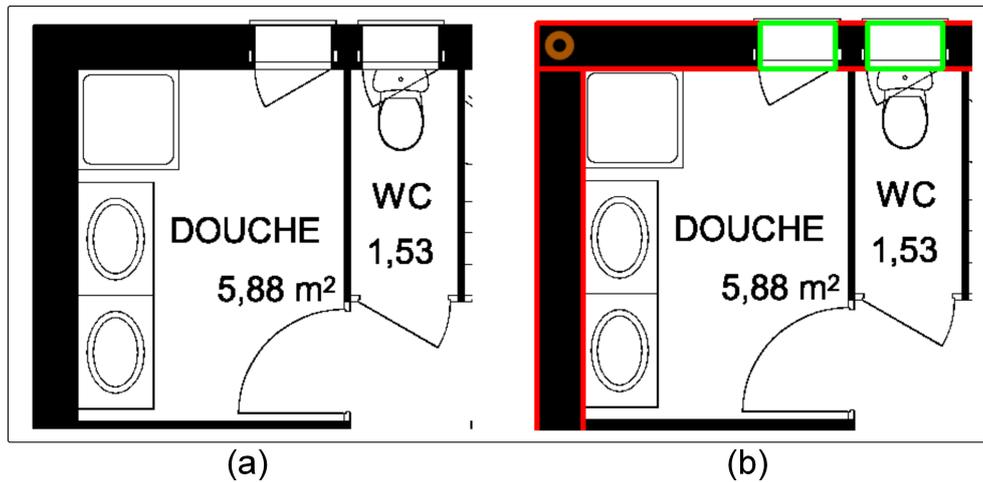


FIGURE 2.10 – Reconstruction de la forme extérieure du bâtiment. (a) l'image originale, (b) résultat de la reconstruction extérieure, les murs extérieurs sont représentés en rouge et les ouvrants extérieurs en vert. Le cercle marron symbolise un point topologique entre les deux murs extérieurs.

2.4.2 Reconstruction intérieure

Lors de la reconstruction intérieure, les murs et ouvrants intérieurs sont identifiés et validés. Un mur *intérieur* a deux principales caractéristiques :

1. Il n'est pas un composant de la forme extérieure du bâtiment.
2. Il est localisé à l'intérieur de la forme extérieure du bâtiment.

Tous les murs positionnés hors de la forme extérieure du bâtiment sont donc supprimés. Un mur intérieur peut être indifféremment lié à des murs extérieurs et intérieurs sans contrainte sur la position de la liaison. De fait, un ouvrant intérieur est alors un ouvrant ayant pour mur de référence un mur de type intérieur.

Ainsi, les éléments intérieurs peuvent être définis de la façon suivante où B_{wI} est un mur candidat intérieur, B_O un ouvrant et P_t un point topologique :

$$E_I = \begin{cases} \{\{B_{wI_i}\}_{i=0..n}, \{B_{O_j}\}_{j=0..p}, \{P_{t_k}\}_{k=0..q}\} \\ \forall B_O \in \{B_{O_j}\}_{j=0..p}, B_{O_{B_w}} \in \{B_{wI_i}\}_{i=0..n} \\ \forall B_w \in \{B_{wI_i}\}_{i=0..n}, B_w \subset F_B \end{cases} \quad (2.9)$$

Chaque ouvrant doit avoir son mur de référence appartenant aux murs candidats intérieurs. De plus, tous les murs intérieurs doivent être positionnés à l'intérieur de la forme

extérieure définie précédemment.

L'ensemble des murs intérieurs contient, entre autres, les murs classés initialement comme extérieurs mais n'ayant pas de relation topologique avec d'autres murs extérieurs à la fin du processus de reconstruction de la forme extérieure. C'est pourquoi, il faut préalablement vérifier et nettoyer le groupe des murs intérieurs afin qu'aucun artefact ne soit présent.

Différents tests sont appliqués se basant sur divers critères. Les murs de longueur trop petite par rapport à l'ensemble des murs intérieurs sont supprimés, ces murs peuvent par exemple être des éléments reconnus à partir d'une voiture présente dans un garage.

Les murs intérieurs inclus entièrement dans un mur extérieur sont eux aussi supprimés. Enfin la même méthode de validation utilisée pour les murs extérieurs, basée sur la densité de pixels noirs de l'image originale, a été appliquée aux murs intérieurs en faisant la même hypothèse de représentation graphique. Cependant, le seuil est plus élevé que pour les murs extérieurs, fixé lui aussi empiriquement. Cela s'explique par le fait que les ouvrants intérieurs sont principalement des portes et qu'ils entraînent des interruptions dans le mur. Le mur est conservé si la proportion de pixels noirs sur l'image originale est d'au minimum 60%.

Les méthodes développées pour reconstruire l'intérieur d'un bâtiment sont différentes de celles utilisées pour la reconstruction de la forme extérieure du bâtiment. La recherche d'ouvrants intérieurs ainsi que les corrections géométriques et topologiques des murs intérieurs se font simultanément. Cependant, comme pour la reconstruction de la forme extérieure, la recherche de liens topologiques est effectuée afin de garantir la cohérence des objets.

Pour cela, des recherches d'intersection entre murs intérieurs sont effectuées. Ces intersections sont validées dans les deux cas suivants :

1. Si un ouvrant est présent entre les deux murs.
2. Si le mur créé à la suite de l'intersection entre les deux murs satisfait les conditions d'un mur intérieur.

De plus, des recherches supplémentaires d'ouvrants sont effectuées entre deux murs parallèles dont la distance est proche de celle d'un ouvrant. Ces techniques permettent de retrouver les ouvrants intérieurs manquants et de corriger l'ensemble des murs intérieurs.

Lors de la reconstruction intérieure du bâtiment, les éléments extérieurs précédemment identifiés sont considérés comme figés. Il est en effet impossible de modifier les caractéristiques topologiques, géométriques ou sémantiques des murs et des ouvrants extérieurs. Si des intersections ont lieu entre un élément intérieur et un extérieur, seules les propriétés de l'élément intérieur sont modifiées afin de corriger cette intersection.

La figure 2.11 représente le résultat des traitements appliqués pour réaliser la reconstruction intérieure du bâtiment. Les murs intérieurs sont représentés en bleu et les portes intérieures en rose. Les cercles de couleur marron représentent les points topologiques entre murs. Un ouvrant est positionné à l'intérieur d'un mur, les points topologiques autour de la porte horizontale correspondent donc aux intersections du mur dans lequel est

positionné la porte avec les deux murs verticaux.

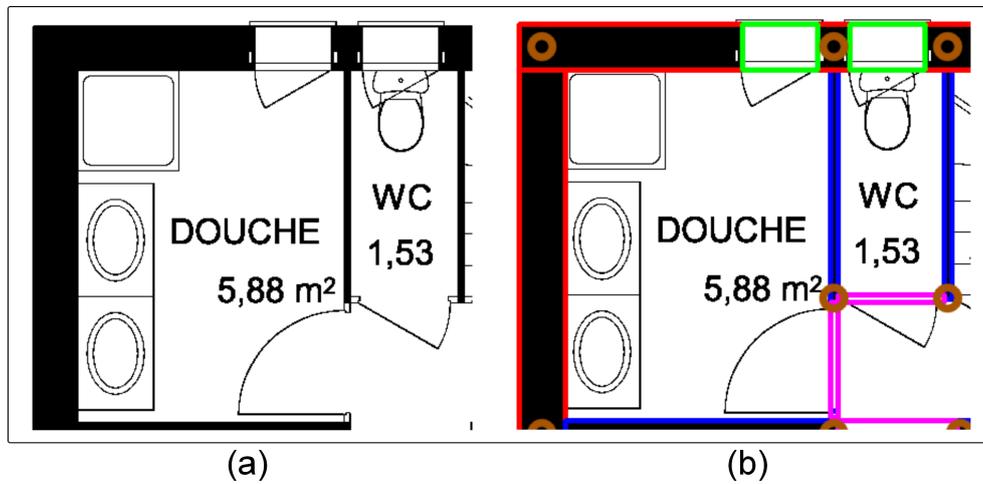


FIGURE 2.11 – Reconstruction intérieure du bâtiment. (a) l'image originale, (b) résultats de la reconstruction, les murs intérieurs sont représentés en bleu et les portes en rose. Les cercles marrons symbolisent les points topologiques.

Le modèle est maintenant composé de l'ensemble des murs et ouvrants de type intérieur et extérieur. La forme extérieure du bâtiment ainsi que la reconstruction intérieure ont été réalisées. L'étape suivante consiste alors à rechercher les espaces, c'est à dire à identifier les pièces du bâtiment sans modifier la position des murs et des ouvrants.

2.4.3 Recherche d'espaces

La recherche d'espaces est une étape essentielle dans la reconstruction de la maquette numérique. En effet, les espaces apportent une information supplémentaire sur l'organisation interne du bâtiment. Ce découpage donne une information sémantique et il est utilisé dans diverses applications telles que de la simulation thermique. Les espaces sont reconstruits grâce à l'utilisation des informations géométriques et topologiques des différents éléments du bâtiment en les complétant par les éléments textuels du plan définis précédemment.

Un espace est une zone homogène du bâtiment dont le périmètre est défini par un ensemble de murs et d'ouvrants formant un polygone fermé géométriquement et topologiquement. Chaque espace est indépendant géométriquement. Un espace noté S est défini par la formule suivante :

$$S = \begin{cases} \{P_{t_k}\}_{k=3..n}, t_1 \\ t_1 \subset S \\ A_S > A_{min} \end{cases} \quad (2.10)$$

Un espace est donc constitué d'un ensemble de points topologiques qui sont eux-mêmes reliés à des murs de type intérieur ou extérieur et par conséquent à leurs ouvrants associés. Afin d'obtenir un polygone fermé géométriquement et topologiquement, le nombre de points topologiques doit être au minimum de trois avec la condition qu'ils ne soient pas

alignés. Le premier et le dernier mur doivent être reliés afin de définir une forme continue et fermée.

De plus, un espace est également défini par un élément textuel qui doit être positionné à l'intérieur du polygone formé par les points topologiques. Afin de valider un espace, sa surface notée A_S couverte par l'espace doit être supérieure à un seuil A_{min} .

Pour déterminer un espace, nous avons fait l'hypothèse qu'un élément textuel doit se trouver à l'intérieur de la pièce. L'information portée par le texte est en effet utile car une pièce d'un bâtiment est généralement définie par son nom et éventuellement son aire. Cela apporte une information géométrique sur la position de la pièce mais aussi une information sémantique qui permet de déterminer l'usage de la pièce (chambre, cuisine, salle de bains, garage) et de vérifier l'aire obtenue avec celle éventuellement inscrite sur le plan.

Pour sélectionner l'ensemble des points topologiques de chaque pièce, un graphe topologique est créé suite à la reconstruction de la forme extérieure du bâtiment et de son intérieur. La figure 2.12 représente celui déduit des résultats précédents (cf. figure 2.11). Un cercle représente un point topologique entre deux murs et un trait relie deux points topologiques d'un même mur.

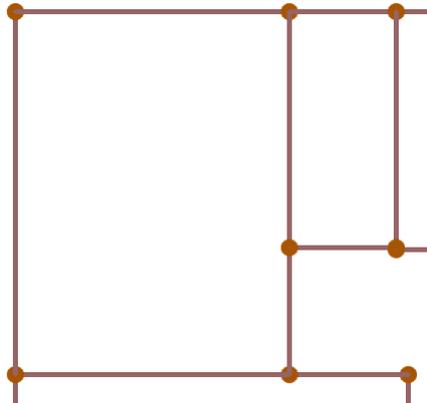


FIGURE 2.12 – Graphe topologique créé à partir de la reconstruction de la forme extérieure du bâtiment et de son intérieur.

La méthode que nous avons choisie de développer est similaire à diverses techniques existantes se basant sur la recherche de murs entourant un élément textuel [64]. Cependant, dans notre approche, les murs sont déjà reconnus et validés lors de la phase de recherche d'espaces. Nous faisons également l'hypothèse qu'une pièce est définie par des formes rectangulaires. Cette hypothèse est forte car des pièces complexes ne seront pas identifiées mais elle permet néanmoins d'identifier une majorité de pièces.

L'approche adoptée est complétée par des méthodes utilisant la croissance de région [63]. L'idée développée est d'utiliser chaque boîte englobante contenant un élément texte comme une amorce d'espace. La région définie initialement par la boîte englobante croît dans toutes les directions jusqu'à intersecter une limite définie par un mur ou ouvrant. Les points topologiques sont ensuite utilisés pour déterminer si la région est fermée. Si c'est le cas, l'espace est validé (cf. figure 2.13).

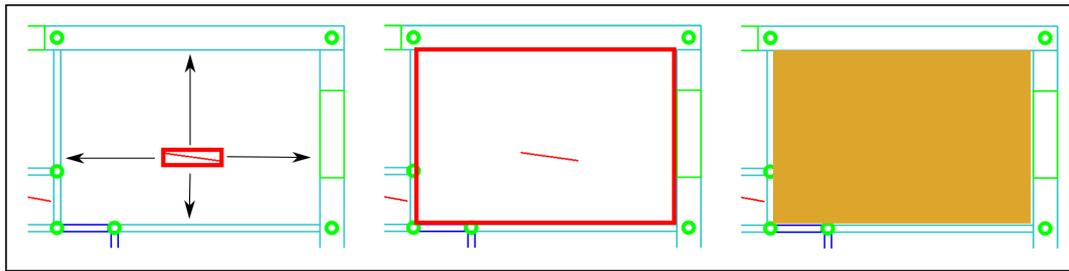


FIGURE 2.13 – Reconstruction des espaces : cas d'un espace avec une géométrie simple. Dans l'image tout à gauche, le segment rouge représente la diagonale de la boîte englobante. Cette boîte est étendue selon les quatre directions. Les points verts représentent les points topologiques. Dans l'image du milieu la région définie par l'extension de la boîte englobante est représentée en rouge. L'image de droite représente en jaune l'espace final.

Dans le cas où la géométrie de la pièce est plus complexe, lorsqu'elle n'a notamment pas une forme rectangulaire, une recherche de région complémentaire est effectuée afin de compléter la région actuelle (cf. figure 2.14). De même que précédemment, l'espace est validé si l'ensemble des points topologiques de l'espace forme un cycle fermé topologiquement et géométriquement.

Afin de traiter des pièces avec des géométries non polygonales ou comportant des murs avec des ouvertures, la méthode envisagée est d'étendre la notion de croissance de région pour ne plus être limité par les quatre directions prédéfinies.

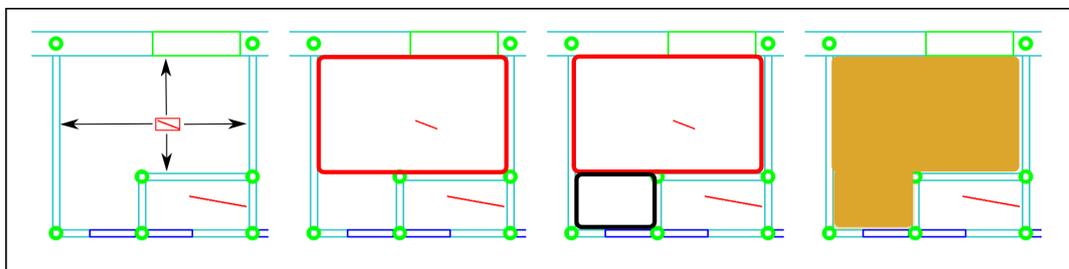


FIGURE 2.14 – Reconstruction d'un espace avec une géométrie complexe. Dans l'image tout à gauche, le segment rouge représente la diagonale de la boîte englobante. Cette boîte est étendue selon les quatre directions. Le rectangle rouge de l'image du milieu est le résultat de l'extension de la boîte englobante. La région est dans ce cas insuffisante pour déterminer l'ensemble de l'espace. Le rectangle noir est le résultat de la recherche complémentaire d'espace. L'image de droite représente l'espace finalement obtenu en jaune.

2.5 Export 3D

Une fois tous les éléments du plan reconnus et assemblés de façon cohérente entre eux, l'étape suivante consiste à exporter ces données pour générer une maquette numérique dans un format compatible avec le BIM afin qu'elle puisse être utilisée dans des logiciels du marché. Le modèle de données interne utilisé doit donc être à la fois pratique et adapté

aux traitements mis en place mais aussi proche des formats liés au BIM pour permettre une conversion sans difficulté et éviter la perte d'information lors de l'export.

2.5.1 Caractéristiques du modèle de données interne

Le modèle de données répond à différentes contraintes. Tout d'abord, il doit être capable de référencer et de gérer pour chaque type d'objet ses trois composantes qui sont la géométrie, la topologie et la sémantique. La mise à jour des données doit pouvoir être réalisée simplement car elles sont régulièrement modifiées lors des différentes étapes.

La section précédente a permis d'identifier clairement les différents objets nécessaires pour la conversion ainsi que leurs propriétés. L'accès informatique aux caractéristiques de chaque objet doit se faire rapidement en évitant les redondances.

Il est souhaitable que le modèle de données interne utilisé soit proche d'un modèle existant pour faciliter les interfaces. En effet, si on utilise pour modèle de données interne un standard existant, le risque que ce standard soit modifié n'est pas négligeable et il faut alors reprendre la totalité de l'architecture logicielle pour mettre à jour l'ensemble du modèle.

A l'inverse, si on utilise un modèle de données interne indépendant de standards, il suffit simplement (en cas de modification du standard) de mettre à jour la méthode de conversion du modèle interne vers le standard. Ainsi, la genericité du programme informatique et sa pérennité sont assurées et on peut envisager de développer différentes méthodes pour exporter la maquette numérique vers d'autres formats suivant les besoins.

Tous les éléments utilisés lors de la conversion du plan 2D scanné vers la maquette numérique ont été décrits dans la section précédente. La figure 2.15 est un schéma récapitulatif de chaque objet du point élémentaire à l'espace en indiquant pour chacun les propriétés qui caractérisent l'objet par rapport à ceux ayant servis à le définir.

Par exemple, un mur est créé à partir d'éléments géométriques et il est ensuite utilisé pour la création d'ouvrants et de points topologiques. Un mur porte une information sémantique liée à son type (intérieur ou extérieur). L'information géométrique est transmise par les points par l'intermédiaire des éléments géométriques.

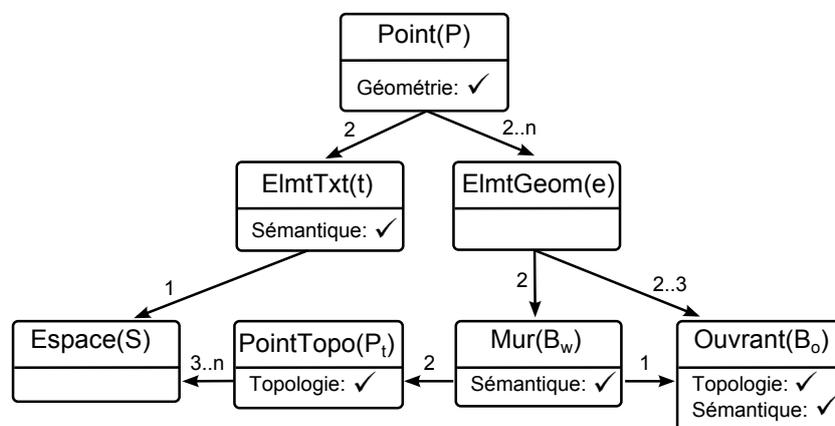


FIGURE 2.15 – Modèle interne déduit de la description des objets

Actuellement, un des standards le plus utilisé pour le BIM est l'IFC (*Industry Foundations Classes*)³. L'IFC est un modèle complet pour la conception et la gestion d'un bâtiment. Il contient non seulement toutes les informations liées à la structure du bâtiment (murs, matériaux, canalisations) mais aussi les données nécessaires à sa gestion (évaluation des coûts de construction ou de maintenance). Il est composé d'au moins 900 classes permettant de décrire tous les objets et leurs composantes. Cependant, c'est aussi un modèle difficile à interpréter car tous les liens entre objets sont explicitement renseignés, ce qui peut générer de la redondance d'information.

Un fichier IFC est le plus souvent une succession de déclarations dépendantes les unes des autres. Chaque déclaration d'objet fait souvent référence à plusieurs autres objets récursivement. Cette succession de déclarations rend le fichier IFC difficilement lisible sans une librairie adaptée qui extrait et manipule la structure du fichier IFC.

Le modèle représenté en figure 2.15 est composé d'objets qui ont une équivalence en IFC. C'est pourquoi, nous avons choisi d'utiliser l'IFC pour concevoir notre modèle interne de données. Cependant, nous en avons extrait seulement les classes et les liens entre classes correspondant à nos besoins. Nous les avons adaptés afin d'obtenir un modèle de données interne proche d'un standard mais suffisamment différent pour ne pas être lié à une version unique de l'IFC. En effet, l'IFC est un standard qui est en constante évolution et régulièrement mis à jour. Ce modèle de données a été nommé "IfcLight" et il est décrit plus précisément dans la section suivante.

2.5.2 Le modèle IfcLight

2.5.2.1 Présentation générale

Les classes extraites du modèle IFC pour concevoir le modèle IfcLight sont listées ci-dessous. Elles permettent de modéliser l'ensemble des éléments extraits du plan. Cependant cette liste n'est pas exhaustive et pourrait être complétée par d'autres éléments tels que les escaliers ou le mobilier qui ne sont actuellement pas reconnus.

- Etage : IfcBuildingStorey
- Espace : IfcSpace
- Mur : IfcWall
- Porte : IfcDoor
- Fenêtre : IfcWindow
- Sol : IfcSlab

Le modèle IFC répond à certaines contraintes sur la gestion des trois composantes et il est nécessaire de modifier ou d'adapter certaines classes. Les sous-sections suivantes décrivent comment l'IfcLight a été créé en adaptant et en intégrant dans notre propre modèle de données interne les classes citées ci-dessus.

Avant de décrire la structure du bâtiment, une étape préliminaire en IFC consiste à décrire le site (classe : *IfcSite*) sur lequel le bâtiment est implanté ainsi que les caractéristiques du bâtiment (classe : *IfcBuilding*) telles que l'adresse et l'étage (classe : *IfcBuildingStorey*). Ces trois éléments ont la particularité de ne pas avoir l'obligation

3. <http://www.buildingsmart-tech.org/specifications/ifc-overview>

de porter une géométrie propre mais sont indispensables en préambule du fichier IFC. Ils contiennent de l'information sémantique sur le bâtiment mais aussi topologique car chaque élément est explicitement en lien avec son étage de référence.

2.5.2.2 Géométrie

La géométrie permet de décrire la forme et les dimensions des objets. En IFC, plusieurs géométries sont possibles pour définir un même objet. Par exemple, un élément en IFC peut être décrit géométriquement par une ligne 2D, une surface qui sera extrudée ou encore un ensemble de faces formant un solide. Le choix de la géométrie utilisée est alors fortement lié à l'objet. Elle est souvent définie grâce à la classe *IfcProductDefinitionShape* qui peut par la suite implémenter une ou plusieurs géométries (classe : *IfcShapeRepresentation*).

Ainsi, il est par exemple difficile de récupérer manuellement les coordonnées géométriques d'un mur à partir de sa déclaration initiale. Il est nécessaire de passer par un nombre important de déclarations et d'objets intermédiaires. Pour récupérer, à partir de la déclaration d'un mur (classe : *IfcWall*), les points permettant de reconstruire la forme géométrique, cinq étapes intermédiaires sont généralement nécessaires : définition du type de géométrie, de la représentation, du solide, du polygone, de la polyligne et des points (classe : *IfcCartesianPoint*). Un mur peut par exemple être défini par une ligne 2D mais aussi une surface que l'on peut extruder.

Chaque point d'un élément est placé dans un repère local par rapport à un objet de référence. Par exemple, un mur est placé localement par rapport à un étage qui est lui-même localisé par rapport au bâtiment et ainsi de suite. Cette hiérarchisation ne permet pas l'accès direct aux objets et nécessite plusieurs opérations intermédiaires pour retrouver à partir d'un point ses coordonnées dans le repère local. Chaque transformation (classe : *IfcLocalPlacement*) est définie par un point et deux directions décrivant le repère associé.

Dans le modèle *IfcLight*, une seule géométrie est retenue pour l'ensemble des objets qui sont tous localisés dans le repère local du bâtiment sans création de repères intermédiaires. La géométrie retenue est la *BoundingBox* qui décrit le polygone de surface de l'objet que l'on peut ensuite extruder pour générer la troisième dimension. Chaque *BoundingBox* est décrite par un ensemble de points formant un polygone fermé. La ligne 2D n'a pas été retenue car elle ne conserve pas l'information liée à l'épaisseur des éléments.

Certains éléments du bâtiment ne peuvent pas être modélisés précisément comme les escaliers par exemple. En effet, en IFC, chaque marche de l'escalier est décrite par un ensemble de surfaces afin de le reconstituer en 3D. Cela n'est pas possible en utilisant *IfcLight* où l'escalier ne peut être défini que par son enveloppe englobante au sol. Cette représentation est suffisante car sur le plan 2D, les escaliers sont généralement représentés par leur emprise au sol sans une représentation détaillée de toute leur structure.

2.5.2.3 Topologie

La topologie permet de décrire les liens entre les objets. Cette information est primordiale car elle permet par exemple de retrouver aisément tous les ouvrants d'un mur ou les murs liés avec un autre mur pour reconstruire par la suite les espaces. Une topologie

clairement définie permet un accès plus rapide aux propriétés du bâtiment.

En IFC, tous les liens topologiques sont explicitement définis par des classes spécifiques, propres à la nature de la relation. Un premier ensemble de classes donne seulement une information topologique comme la classe *IfcRelAggregates* qui lie par exemple un bâtiment à un site. Le deuxième ensemble décrit lui aussi le lien topologique en indiquant plus précisément la nature géométrique du lien comme la classe *IfcRelConnectsPathElement* qui met en relation deux murs en indiquant pour chacun la position de la connexion (début, fin). La géométrie de la relation peut être précisée en décrivant le lien (classe : *IfcConnectionCurveGeometry*).

Dans le modèle IfcLight, l'information topologique est portée en partie par les points topologiques qui définissent les liens entre les murs en explicitant le point de jonction des deux murs.

Les portes et les fenêtres ne sont pas en IFC directement reliées à leur mur de référence. Un objet intermédiaire *IfcOpeningElement* est utilisé pour inclure chaque ouvrant dans son mur de référence comme explicité sur le schéma de la figure 2.16.

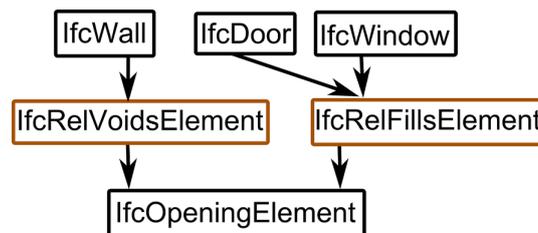


FIGURE 2.16 – Détails des classes nécessaires pour la mise en relation en IFC d'un mur et d'un ouvrant en utilisant un objet intermédiaire (*IfcOpeningElement*). Les classes portant l'information topologique sont représentées en marron.

Le principe est le suivant : l'objet *IfcOpeningElement* crée une ouverture dans le mur qui sera comblée par l'ouvrant. Cela permet de déterminer l'emplacement des ouvrants sans préciser directement la géométrie de l'objet afin de décrire avec précision une porte ou une fenêtre. La description d'une fenêtre comprend par exemple son châssis, les montants, la vitre, etc.

Dans notre cas d'étude, peu d'informations sont disponibles sur la géométrie des fenêtres et des portes. L'IfcLight n'utilise donc pas cet élément intermédiaire et relie directement un mur à son ouvrant. L'ouvrant a sa géométrie propre qui doit néanmoins être compatible avec celle du mur associé. En utilisant cette représentation, lorsque l'on exporte le modèle IfcLight vers le standard IFC, il est facile de générer cet élément intermédiaire afin d'être conforme aux normes IFC.

2.5.2.4 Sémantique

La sémantique décrit l'ensemble des caractéristiques d'un objet sous forme d'attributs, tels que les matériaux utilisés pour la construction d'un mur. En IFC, les propriétés sémantiques sont attachées à chaque élément à l'aide de différentes classes telles que *IfcRelAssociatesMaterial*, *IfcRelDefinesByProperties* ou *IfcRelDefinesByType*. Un des avantages de l'IFC est de pouvoir ajouter des propriétés suivant les besoins.

Par exemple, quelques propriétés d'une porte déjà implémentées en IFC sont la possibilité d'un accès handicapé, si la porte est coupe feu ou si elle se ferme automatiquement. Ces propriétés sont portées par la classe *PsetDoorCommon* qui est reliée à la classe *IfcDoor* par la relation *IfcRelDefinesByProperties*. Il est possible d'associer à un élément plusieurs classes de propriétés et donc de rajouter des propriétés si nécessaire.

Dans le modèle *IfcLight*, les propriétés sémantiques sont portées par l'objet à l'aide d'attributs supplémentaires et non pas par des classes intermédiaires ce qui simplifie l'accès aux données et permet de ne conserver que les propriétés que l'on peut extraire à partir du plan 2D.

Le modèle *IfcLight* est présenté dans la figure 2.17 sous la forme d'un diagramme de classes de UML. On retrouve les différentes caractéristiques présentées précédemment. Les murs et les ouvrants sont composés de points définissant leur géométrie. Chaque ouvrant est relié à son mur de référence. Les murs sont reliés entre eux par des points topologiques qui permettent la définition des espaces. Les portes, ouvrants et espaces sont reliés à un unique étage qui est lui même inclus dans un bâtiment qui est positionné dans un site.

La sémantique de chaque élément est portée par les attributs des classes. Ce modèle a la particularité d'être suffisamment proche du modèle IFC pour permettre un export du modèle interne vers l'IFC tout en étant indépendant de ce format pour ne pas être limité par des évolutions futures. De plus, ce modèle peut être aussi étendu pour intégrer des évolutions méthodologiques.

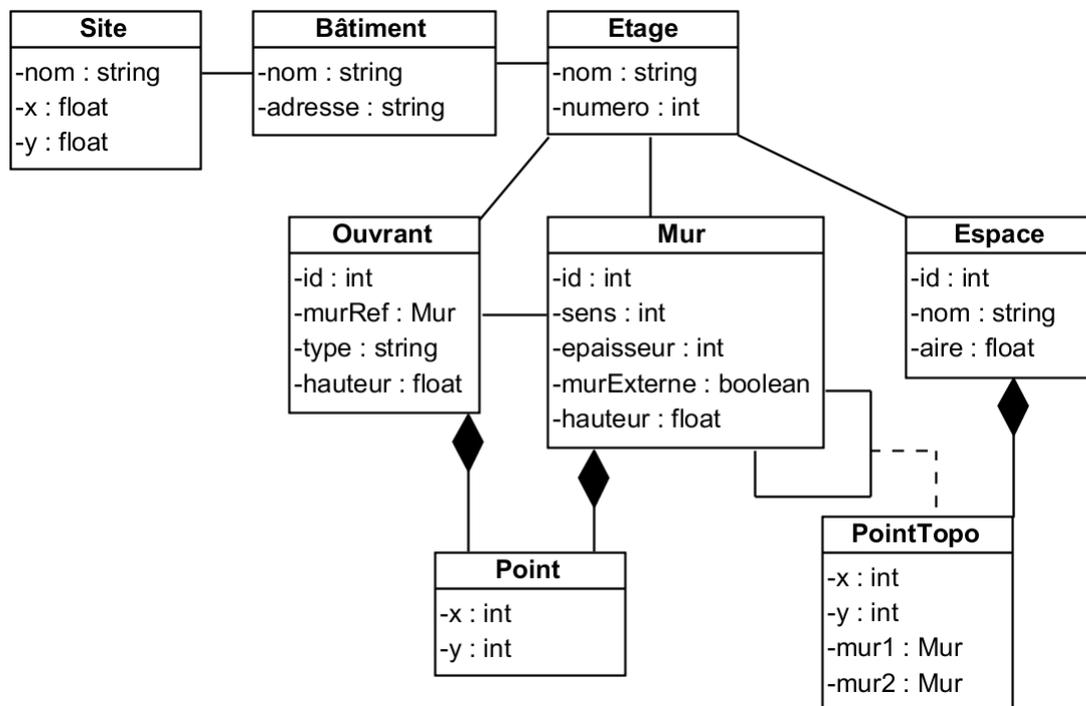


FIGURE 2.17 – Diagramme de classe du modèle interne utilisé : *IfcLight*.

2.6 Évaluation de performance

Dans cette section, nous présentons les résultats de l'évaluation du prototype développé à partir de la méthodologie présentée précédemment grâce à une base d'images de 90 plans de maisons individuelles.

2.6.1 Développement d'un prototype

Le prototype développé permet de générer automatiquement une maquette numérique 3D au format IFC à partir d'une image de plan. Il a été écrit en C++ et intègre des fonctions provenant de deux bibliothèques différentes :

- OpenCV⁴ (Open Source Computer Vision) pour tout ce qui concerne le traitement de l'image : méthodes de Hough, lecture ou écriture d'une image.
- Qgar⁵ développée au LORIA en France pour la binarisation, la séparation du texte et des éléments graphiques dans une image et la recherche des boîtes englobantes autour de chaque mot.

Toutes les méthodes concernant la reconnaissance des éléments du bâtiment (murs et ouvrants), la reconstruction de la maquette numérique (forme extérieure, reconstruction intérieure et recherche d'espaces) ainsi que son export ont été développées en interne en utilisant le modèle de données présenté dans la section précédente (cf. figure 2.17).

Seuls quelques paramètres sont nécessaires à l'exécution du programme : les épaisseurs minimum et maximum autorisées pour les murs, l'échelle utilisée dans l'image pour passer du pixel au mètre ainsi que la hauteur du bâtiment. De plus, une image originale de plan est attendue en donnée d'entrée du programme.

A la fin du processus, la maquette numérique est exportée dans un fichier au format IFC. Ce fichier est par la suite directement importé dans un logiciel de visualisation de fichier IFC : *DDS-CAD viewer*⁶.

2.6.2 Présentation des données tests

Pour évaluer et valider les méthodes développées, nous avons utilisé un ensemble d'images de plans de maisons individuelles (90 plans) mis à disposition par l'université de Barcelone et qui est une base de référence pour les benchmarks dans le domaine de reconnaissance de documents architecturaux [65].

Ces plans présentent des complexités variées ainsi que des détails et des configurations différentes. Les images suivantes illustrent les résultats obtenus sur un plan de la base. Un exemple d'image originale est présentée en figure 2.18. C'est un plan avec des formes géométriques simples qui comporte des portes fenêtres donnant vers l'extérieur et trois épaisseurs de murs différentes.

4. <http://opencv.org/>

5. <http://www.qgar.org/>

6. <http://www.dds-cad.net>

CHAPITRE 2. GÉNÉRATION AUTOMATIQUE D'UNE MAQUETTE NUMÉRIQUE 3D À PARTIR D'UN PLAN 2D SCANNÉ

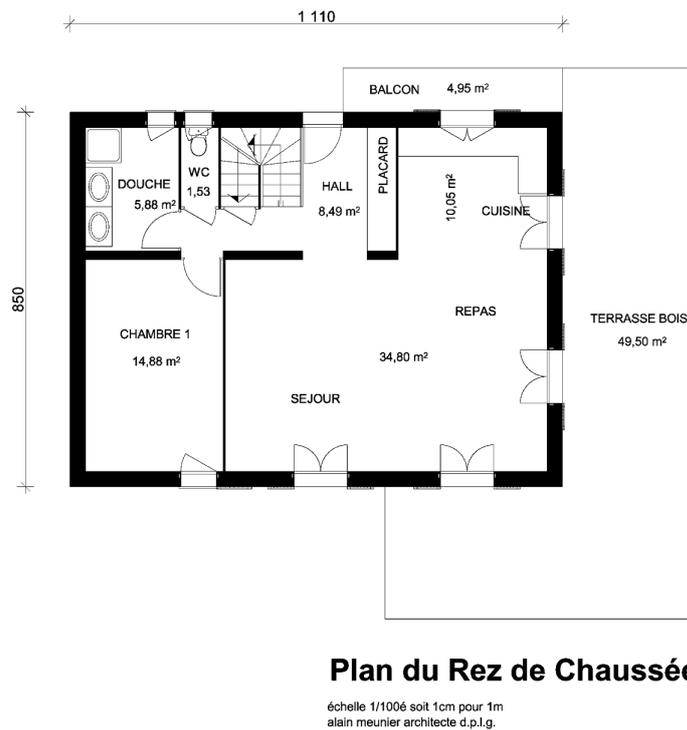


FIGURE 2.18 – Image originale extraite de la base de plans. La dimension de l'image est de 2480 × 3508 pixels mais elle a été ici recadrée en supprimant les pixels blancs sans information.

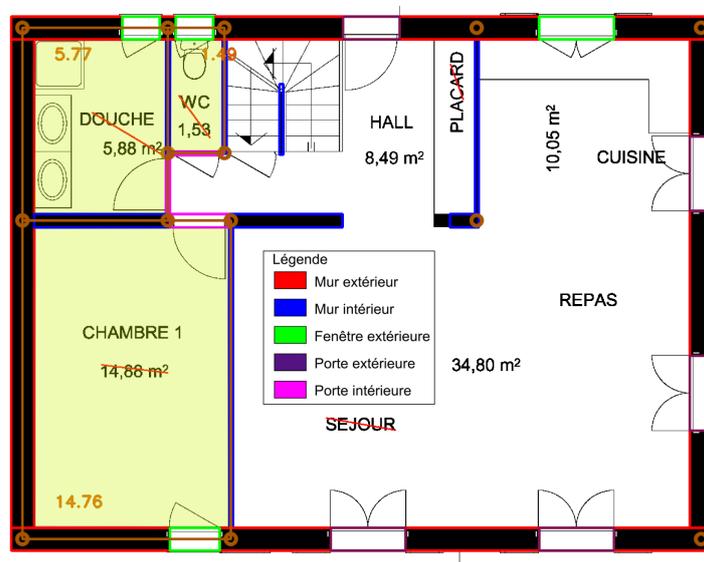


FIGURE 2.19 – Image obtenue après la reconnaissance automatique. Les cercles de couleur marron sont les points topologiques, les segments en marron représentent les espaces dont la surface est en jaune. Les segments en rouge dans l'image sont les diagonales des boîtes englobantes des éléments textuels après traitement. L'aire obtenue par calcul pour chaque espace reconnu est inscrite en marron.

Le résultat de la reconnaissance automatique est présenté en figure 2.19 et celui de l'export en figure 2.20. Le temps d'exécution pour traiter l'image et exporter le fichier au

format IFC est inférieur à 2 minutes. On peut noter que l'ensemble des éléments extérieurs (murs et ouvrants) a bien été reconnu. L'enveloppe externe du bâtiment est fermée et tous les ouvrants sont bien identifiés avec une sémantique correcte. Au niveau des éléments intérieurs, une partie de mur est manquante entre la cuisine et le hall. La porte donnant sur l'escalier n'a pas été identifiée.

Les aires calculées pour chaque espace reconnu sont proches des aires renseignées sur le plan, l'erreur est inférieure pour chaque espace à 3%. Les espaces qui ne sont pas constitués par un ensemble fermé de murs ne sont pas reconnus comme le hall, la cuisine ou le séjour. Chacune de ces pièces ne constitue pas un espace fermé par des portes ce qui rend leur identification impossible. De plus, l'espace formé par ces trois pièces est trop complexe à reconnaître automatiquement avec nos méthodes.

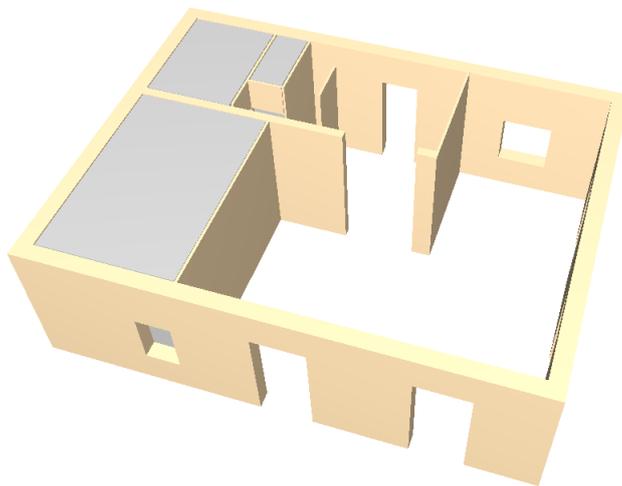


FIGURE 2.20 – Image extraite du logiciel DDS-CAD viewer après import du fichier IFC généré automatiquement lors de la reconnaissance. Les espaces sont représentés en couleur grise.

2.6.3 Méthodes d'évaluation

Afin d'évaluer et de valider nos résultats sur l'ensemble de la base de plans, nous avons mis en place deux métriques différentes. La première est basée sur une évaluation au niveau des pixels et la deuxième est une évaluation de la forme du bâtiment et de ses propriétés.

2.6.3.1 Évaluation au niveau des pixels

L'évaluation des résultats au niveau des pixels se fait en calculant des matrices de confusion entre une image dite *vérité terrain* et l'image finale. La méthode la plus courante est de comparer des valeurs binaires. Par exemple, dans la méthode de De las Heras et al. [65] un pixel peut avoir deux valeurs : 1 si c'est un pixel assimilé à un mur et 0 sinon. La matrice de confusion associée est représentée dans le tableau 2.1.

TABLE 2.1 – Matrice de confusion pour une évaluation des murs

		Estimation	
		Sol	Mur
Vérité terrain	Sol	Vrai négatif	Faux positif
	Mur	Faux négatif	Vrai positif

Tous les pixels étant reconnus comme des éléments de murs ou étant catalogués comme des murs dans l'image vérité terrain sont comptabilisés. Cette matrice, résultat du comptage, permet de synthétiser le nombre de pixels dit *Vrai positif*, c'est à dire qu'ils sont étiquetés comme des murs dans l'image vérité terrain et dans l'image finale.

Si un pixel est reconnu comme du mur mais qu'en réalité ça n'en est pas un, on dit qu'il est *Faux positif*. Inversement, si un pixel de mur de l'image vérité terrain n'a pas été reconnu comme tel dans l'image finale, ce pixel est appelé *Faux négatif*. Les pixels *Vrai négatif* sont ceux n'étant pas reconnus comme des murs et n'étant pas étiquetés comme tels dans l'image vérité terrain.

Ces matrices de confusion sont ensuite utilisées pour calculer un indicateur de performance appelé Jaccard Index (JI) [65]. Son intérêt principal est que la performance est calculée sur les éléments du bâtiment et pas sur la reconnaissance du sol, ce qui fausserait l'évaluation de part leur nombre. En effet, sur une image de plan, la proportion de pixels représentant des éléments du bâtiment est faible. De plus, le Jaccard Index est adapté pour l'évaluation de plusieurs classes d'objets. Sa valeur est comprise entre 0 et 1, 1 lorsque la reconnaissance est parfaite. Le Jaccard Index est défini avec la formule suivante :

$$JI = \frac{VraiPositif}{VraiPositif + FauxPositif + FauxNegatif} \quad (2.11)$$

Dans notre cas, les murs et les ouvrants sont identifiés dans l'image et une distinction sémantique est faite entre éléments intérieurs et extérieurs. Afin de pouvoir générer des matrices de confusion comparant tous les éléments, un étiquetage manuel de la base de plans a été réalisé afin de prendre en compte les éléments suivants : murs intérieurs et extérieurs, portes intérieures et extérieures, fenêtres. Cela a également permis la création d'une vérité terrain exhaustive et fiable.

Chaque élément a été étiqueté en utilisant le même code couleur que pour la figure 2.19. A partir du résultat de la reconnaissance automatique, une image similaire est générée automatiquement et les deux sont comparées pixel à pixel. La figure 2.21 présente l'image vérité terrain et l'image issue de la reconnaissance de l'exemple précédent.

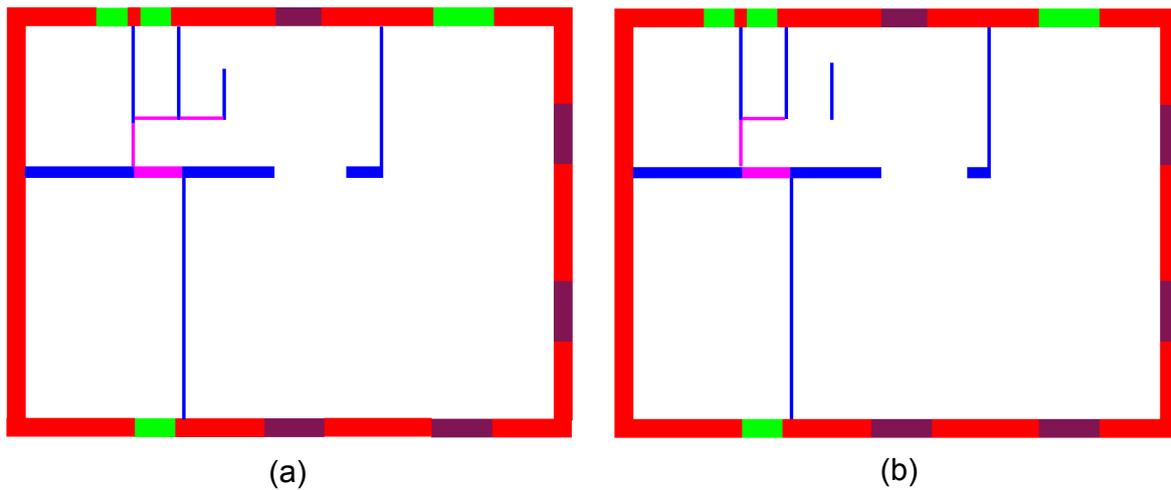


FIGURE 2.21 – Images servant à l'évaluation. (a) l'image vérité terrain étiquetée manuellement, (b) l'image générée à partir du résultat de la reconnaissance automatique. Les murs extérieurs sont en rouge, ceux intérieurs en bleu, les fenêtres en vert, les portes extérieures en violet et celles intérieures en rose.

Grâce à la comparaison de ces deux images par une superposition directe, le Jaccard Index est calculé pour différents critères :

1. Évaluation globale pixel à pixel
2. Murs sans prendre en compte la distinction sémantique entre intérieur et extérieur
3. Murs extérieurs
4. Murs intérieurs
5. Ouvrants sans prendre en compte la distinction sémantique entre intérieur et extérieur
6. Ouvrants extérieurs sans prendre en compte la distinction sémantique entre porte et fenêtre
7. Ouvrants intérieurs

Pour exemple, lors de l'évaluation des murs (critère 2), la matrice de confusion calculée correspond à celle du tableau 2.2. Seuls les pixels de murs sont pris en compte dans le calcul.

TABLE 2.2 – Matrice de confusion générée pour le calcul du Jaccard Index au niveau des murs lorsque plusieurs éléments sont classés.

		Estimation		
		Sol	Mur	Ouvrant
Vérité Terrain	Sol	x	Faux Positif	x
	Mur	Faux Négatif	Vrai Positif	Faux Négatif
	Ouvrant	x	Faux Positif	x

2.6.3.2 Évaluation du bâtiment

La deuxième métrique utilisée consiste à évaluer les résultats au niveau du bâtiment et non plus des pixels. En effet, les maquettes numériques générées sont destinées à être utilisées dans des applications spécifiques telles que la simulation énergétique par exemple. C'est pourquoi le bâtiment doit être cohérent et suivre des règles topologiques ou sémantiques plutôt que d'être une représentation exacte de l'image originale. De plus, suivant les plans architecturaux, l'épaisseur des murs représentée sur le plan n'est pas toujours réelle et celle obtenue lors de la reconnaissance n'est alors pas représentative de la réalité, bien qu'elle soit tout de même évaluée dans la première métrique.

Deux catégories d'éléments sont évaluées ici : les ouvrants et les murs. En ce qui concerne les ouvrants, le principe est de compter pour chaque plan le nombre d'ouvrants qui sont bien reconnus, ceux qui sont manquants et ceux qui sont inexistantes, c'est à dire faux.

Par exemple, pour le plan de la figure 2.19, 5/5 portes extérieures et 4/4 fenêtres extérieures sont bien reconnues. 3/4 portes intérieures sont aussi bien reconnues et il manque 1/4 porte intérieure. Dans cet exemple, il n'y a pas d'éléments inexistantes.

L'évaluation des résultats concernant les murs est effectuée par rapport au nombre de mètres de murs linéaires qui sont bien reconnus, manquants ou inexistantes. Par exemple, pour le plan de la figure 2.19, tous les murs extérieurs sont bien reconnus. Cependant, on remarque qu'il manque 0.24m de mur et que 0.14m de mur identifié est inexistant, au niveau au niveau du mur positionné vers l'escalier et la porte manquante.

Les deux évaluations précédentes concernent principalement les composantes géométriques et sémantiques du bâtiment. La topologie est plus difficile à évaluer automatiquement ou manuellement. En effet, vérifier qu'un mur est bien identifié ou compter le nombre d'ouvrants est une tâche facilement exécutable. Par contre, il est moins aisé de compter le nombre de liens topologiques et de vérifier visuellement ou automatiquement que le lien est bien positionné.

De plus, dans le cas où plusieurs murs se croisent dans une zone proche, il devient difficile de déterminer quels murs sont mis en relation par chaque lien topologique. Nous avons décidé de caractériser les liens topologiques en extrayant dans un premier temps les points topologiques générés afin de les classer en fonction du type de relations :

- Relation entre deux murs extérieurs.
- Relation entre deux murs intérieurs.
- Relation entre un mur extérieur et un mur intérieur.

Ce relevé ne permet pas d'évaluer la véracité des relations topologiques mais il procure un aperçu des relations existantes dans les plans traités ainsi que leur répartition.

Cette évaluation a pour vocation de ne pas prendre pas en compte les petits décalages de quelques pixels pouvant apparaître suite à des imprécisions lors de la création notamment de la base vérité terrain ou lors de la reconnaissance. De plus, l'épaisseur des éléments n'est ici plus évaluée.

2.6.4 Résultats

Des tests ont été effectués sur l'ensemble des 90 images de la base de plans. Les deux métriques ont été appliquées pour évaluer les résultats.

2.6.4.1 Évaluation au niveau des pixels

Deux matrices de confusion ont été calculées sur l'ensemble des plans pour mesurer la qualité de la reconnaissance. Elles permettent de donner une vision claire et synthétique des erreurs effectuées lors de la reconnaissance.

La matrice de confusion du tableau 2.3 ne prend pas en compte la distinction sémantique entre les éléments (intérieur/extérieur et porte/fenêtre). On note le faible taux de confusion entre les murs et les ouvrants. Seulement 8.91% de murs reconnus sont en réalité des ouvrants. En revanche, 30.75% d'ouvrants sont confondus avec le sol, c'est à dire qu'ils sont manquants, de même 14.92% de murs n'ont pas été reconnus.

TABLE 2.3 – Matrice de confusion calculée à partir de l'évaluation des 90 images de la base de plan. Dans cette matrice, la nature sémantique des murs et ouvrants n'est pas évaluée.

		Estimation		
		Sol	Murs	Ouvrants
Vérité Terrain	Sol	99.70%	0.21%	0.09%
	Murs	14.92%	84.40%	0.68%
	Ouvrants	30.75%	8.91%	60.34%

La matrice de confusion suivante (cf. tableau 2.4) prend en compte la nature sémantique de chaque élément et permet une analyse plus fine des résultats. Il apparait clairement que les ouvrants les moins reconnus sont les portes intérieures avec 39.25% de portes intérieures qui ne sont pas reconnues. Les murs extérieurs et intérieurs sont reconnus avec la même proportion (74%).

TABLE 2.4 – Matrice de confusion calculée à partir de l'évaluation des 90 images de la base de plan. Dans cette matrice, la distinction sémantique entre les éléments intérieurs et extérieurs ainsi que la différence entre porte et fenêtre sont prises en compte.

		Estimation					
		Sol	Murs Int.	Murs Ext.	Portes Int.	Fen. Ext.	Portes Ext.
Vérité -Terrain	Sol	99.71%	0.09%	0.11%	0.01%	0.06%	0.02%
	Murs Int.	16.00%	73.74%	9.25%	0.13%	0.79%	0.09%
	Murs Ext.	14.59%	9.95%	74.86%	0.00%	0.49%	0.11%
	Portes Int.	39.25%	4.76%	1.14%	48.61%	1.19%	5.04%
	Fen. Ext.	29.81%	6.05%	3.02%	0.00%	58.69%	2.44%
	Portes Ext.	28.50%	7.96%	2.36%	0.00%	2.60%	58.58%

Environ 10% de murs intérieurs ont été reconnus en tant que murs extérieurs et inversement. Cette mauvaise distinction sémantique est liée au fait que la forme extérieure du bâtiment n'est pas toujours fermée et que des murs extérieurs ne respectant pas les règles topologiques sont alors convertis en murs intérieurs. De plus, on note là aussi que beaucoup d'éléments sont manquants lors de la reconnaissance, environ 15% pour les murs

et de 30 à 40% pour les ouvrants. Les deux matrices précédentes permettent de calculer la valeur du Jaccard Index sur l'ensemble des 90 plans pour plusieurs critères, les résultats sont récapitulés dans le tableau 2.5.

L'évaluation globale pour l'ensemble des 90 plans est de 0.65, pour les murs 0.76 et pour les ouvrants 0.55. Ces résultats montrent que la reconnaissance des ouvrants est moins performante que pour les autres éléments, cette différence est d'autant plus marquée pour les ouvrants intérieurs avec un Jaccard Index de 0.43.

TABLE 2.5 – Évaluation sur les 90 images de la base de plan. Les résultats sont exprimés en utilisant le Jaccard Index calculé selon différents critères.

Critère	Jl
1.Évaluation globale	0.65
2.Murs	0.76
2.1.Murs extérieurs	0.69
2.2.Murs intérieurs	0.44
3.Ouvrants	0.55
3.1.Ouvrants extérieurs	0.55
3.2.Ouvrants intérieurs	0.43

La figure 2.22 représente la distribution des taux de reconnaissance globale, des murs et des ouvrants. Ce graphique montre lui aussi l'impact de la reconnaissance des ouvrants sur l'ensemble des résultats. Cependant, on peut noter les bons résultats obtenus sur la reconnaissance des murs avec un tiers des plans qui obtiennent un Jaccard Index compris entre 0.80 et 0.90 pour les murs.

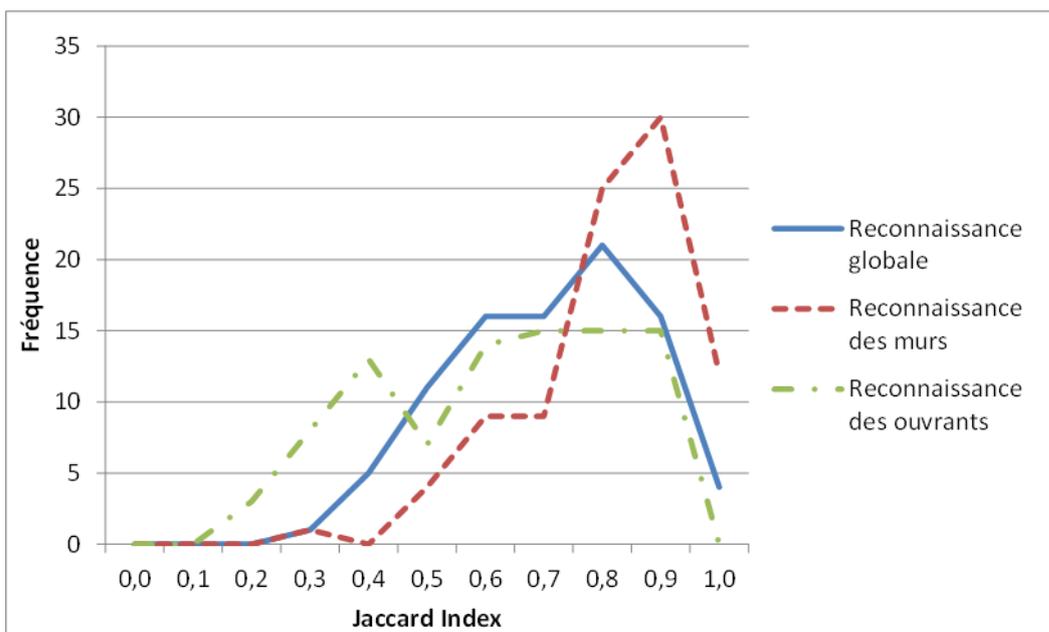


FIGURE 2.22 – Représentation en fréquence des valeurs du Jaccard Index pour la reconnaissance globale, des murs et des ouvrants sur la base d'images des 90 plans.

Il est difficile de comparer ces résultats avec ceux de l'état de l'art car les objectifs lors de la reconnaissance sont différents. Les récents résultats obtenus par De las Heras et al. [65] annoncent un Jaccard Index à 0.97 pour la reconnaissance des murs qui correspond dans notre tableau 2.5 à 0.76.

Cependant, cette comparaison n'est pas forcément pertinente car nous n'avons pas utilisé la même base vérité terrain et surtout, notre méthodologie développée est basée sur un ensemble de règles topologiques et géométriques qui permettent de corriger et d'ajuster les éléments murs afin d'obtenir un bâtiment cohérent. Cela n'est pas le cas pour De las Heras et al. qui font de la reconnaissance au niveau du pixel sans créer par la suite d'éléments du bâtiment. Il n'y a donc pas d'étapes de reconstruction du bâtiment, seulement un étiquetage des pixels sans notion de mur ou d'ouvrant.

Les résultats concernant les performances de reconnaissance des murs ont un fort impact sur la reconnaissance globale car nous évaluons ici des surfaces et l'erreur est calculée de manière quadratique. En effet, une porte intérieure est dans cette base de plans le plus souvent composée de 700 pixels (100 pixels de longueur et 7 d'épaisseur). Un mur extérieur peut contenir jusqu'à 50.000 pixels avec une épaisseur de l'ordre de 40 pixels. Or, l'épaisseur des éléments n'est pas toujours significative de l'épaisseur réelle alors que les longueurs et largeurs du bâtiment le sont.

2.6.4.2 Évaluation du bâtiment

Les résultats concernant l'évaluation des ouvrants sont notés dans le tableau 2.6. Ils ont été obtenus en comptant dans chaque image de la base de plans le nombre d'ouvrants bien reconnus et ceux manquants. Une classification selon le type d'ouvrants a également été effectuée.

Si on ne prend pas en compte la nature sémantique des ouvrants, 1078/1743 ouvrants soient 62% sont correctement identifiés dans les plans. Les ouvrants les moins bien reconnus sont les portes intérieures car 275/654 (42.05%) n'ont pas été reconnues, ce qui fait environ 3 portes intérieures par plan qui sont manquantes.

Cependant, on note que seulement 78 ouvrants inexistantes sont créés sur les 1821 (4%) ouvrants détectés ce qui représente moins d'un ouvrant par plan. Ce résultat est intéressant car il est préférable de générer le moins possible de fausses alarmes, c'est à dire d'éléments inexistantes afin de ne pas trop influencer sur la structure globale de la maquette numérique et fournir une maquette de bâtiment la plus cohérente possible.

TABLE 2.6 – Résultats de l'évaluation de la reconnaissance des ouvrants, ils sont exprimés en nombre d'ouvrants. En horizontal l'estimation, en vertical les données de vérité terrain.

	Manquants	Portes Ext.	Fenêtres Ext.	Portes Int.
Faux	x	10	56	12
Portes Ext.	106 (37.46%)	164 (57.95%)	9 (3.18%)	4 (1.41%)
Fenêtres Ext.	284 (35.24%)	18 (2.23%)	504 (62.53%)	0 (0%)
Portes Int.	275 (42.05%)	10 (1.53%)	1 (0.15%)	368 (56.27%)
Ouvrants reconnus : 62% - Manquants : 38%				

Afin d'évaluer les performances relatives à la reconnaissance des murs, un comptage similaire à celui pour les ouvrants a été réalisé en calculant les mètres de murs linéaires.

Les résultats sont reportés dans le tableau 2.7.

La méthode se révèle plus performante que pour les ouvrants car on reconnaît 6575/7550 mètres de murs soit 87%. Comme pour les évaluations par pixels, on note que 10% soit environ 500 mètres de murs extérieurs ont été reconnus comme des murs intérieurs. De plus, les murs intérieurs sont mieux reconnus que les murs extérieurs avec 2384/2465 soit 86.23% de bonne reconnaissance pour les murs intérieurs contre 3578/4785 (74.79%) pour les murs extérieurs. Comme pour les ouvrants, peu de murs inexistantes sont présents 253/7802 soit 3%.

TABLE 2.7 – Résultats de l'évaluation sur le nombre de mètres de murs linéaires. Les résultats sont exprimés en mètres. En horizontal l'estimation, en vertical les données de vérité terrain.

	Manquants	Murs Ext.	Murs Int.
Faux	x	160	94
Murs Ext.	699 (14.61%)	3578 (74.79%)	507 (10.60%)
Murs Int.	275 (9.97%)	105 (3.80%)	2384 (86.23%)
Murs reconnus : 87% - Manquants : 13%			

Cette deuxième métrique donne des résultats proches de la première mais elle permet surtout de valider certaines conclusions quant à la qualité notamment de la reconstruction intérieure.

2.7 Conclusion - Discussion

Dans ce chapitre, la méthodologie mise en place pour convertir automatiquement un plan 2D scanné en maquette numérique 3D dans un format compatible avec le BIM a été présentée. Une évaluation complète sur une base de 90 plans architecturaux de maison individuelle a également été effectuée.

Les résultats obtenus sont encourageants car on obtient sur l'ensemble des plans 63% d'ouvrants correctement reconnus et 87% de mètres de murs. Peu d'éléments inexistantes sont générés lors de la reconnaissance automatique (4% d'ouvrants et 3% de murs). Cela est important car dans un contexte de rectification de maquette numérique, il est plus facile de créer de nouveaux éléments plutôt que d'en supprimer. De plus, un élément inexistant peut entraîner d'autres erreurs et modifier la structure interne du bâtiment.

Lors de la reconstruction de la maquette numérique, l'étape de création de la forme extérieure du bâtiment est cruciale car elle permet par la suite d'ajuster les murs intérieurs et de rechercher les portes intérieures. Or, il s'avère que celle-ci n'est pas toujours validée, c'est à dire que la forme extérieure du bâtiment n'est pas refermée topologiquement et géométriquement. Les causes varient en fonction des plans mais il arrive que des murs ne soient pas reconnus ou que des liens topologiques ne soient pas identifiés. De fait, les murs extérieurs qui ne sont pas liés avec la forme extérieure sont convertis en murs intérieurs ce qui crée des confusions entre murs intérieurs et extérieurs mais aussi des ouvrants extérieurs manquants car ils ne sont pas recherchés parmi les murs intérieurs.

De plus un nombre non négligeable d'éléments ne sont pas reconnus et manquent à la

maquette numérique. En particulier, les ouvrants intérieurs où 42.05% ne sont pas identifiés. Dans certaines images, plusieurs ouvrants sont positionnés dans la même zone comme par exemple un palier qui va desservir plusieurs chambres. Dans ce cas, les portes ne sont pas toutes identifiées car l'algorithme réalise un ensemble de tests avant de valider une porte intérieure pour éviter que deux portes ne soient trop proches l'une de l'autre. S'il existe un risque que la porte soit fautive alors elle est supprimée. On pourrait rendre ces tests moins sélectifs mais cela augmenterait la génération d'éléments inexistantes ce qui n'est pas souhaitable pour l'application envisagée.

Il est difficile de comparer les résultats avec ceux de l'état de l'art. En effet, nous avons tout d'abord créé notre propre base de vérité terrain afin de prendre en compte l'ensemble des éléments identifiés dans le plan ainsi que leurs propriétés sémantiques. De plus, nos objectifs sont de reconstruire une maquette numérique complète et cohérente dont la géométrie, la topologie et la sémantique sont clairement identifiées et renseignées. Pour cela, des éléments du bâtiment sont créés en respectant diverses règles ce qui peut entraîner de légers décalages sur l'image et cela a un fort impact sur l'évaluation au niveau des pixels.

Le tableau 2.8 est une comparaison qualitative de notre solution avec les trois principales solutions identifiées dans l'état de l'art [63, 64, 65]. La principale différence avec les travaux existants réside dans le fait que nous reconstruisons l'ensemble du bâtiment en intégrant les murs, portes, fenêtres et espaces. Les travaux réalisés par Ahmed et al. [64] ne spécifient pas si le bâtiment est construit dans son intégralité ou si un export 3D est possible. Cependant, tous les éléments étant reconnus, nous supposons que cela est réalisable.

Notre modèle interne de données est compatible avec les formats BIM et permet un export simplifié de la maquette numérique. Cependant, à l'inverse des travaux précédents, nous reconnaissons seulement les espaces à géométrie simple (rectangles et quelques polygones). Certaines pièces dont la géométrie est complexe ne sont pas identifiées de même que celles qui ne sont pas effectivement séparées par des murs comme par exemple une cuisine ouverte sur un salon.

TABLE 2.8 – Comparaison qualitative de la solution proposée avec les trois principales méthodes de l'état de l'art. M=Mur, P=Porte, F=Fenêtre, E=Espace

Étapes	Macé et al. [63]	Ahmed et al. [64]	Heras et al. [65]	Proposée
1.Extraction des éléments du plan	Ligne/Arc			
2.Création des éléments du bâtiment	M/P			M/P/F
3.Assemblage du bâtiment	E	E/(M/P)	E	M/P/F/E
4.Export 3D	x	≈	x	✓
5.Évaluation (nombre de plans)	80	80	122	90

La méthodologie que nous proposons a la particularité d'être flexible et de pouvoir être améliorée par l'ajout de traitements complémentaires ou de données externes. Le chapitre suivant présente l'extension de cette méthodologie pour effectuer des corrections lors de la reconversion afin d'éviter la propagation d'erreurs et obtenir de meilleurs résultats tout en conservant un temps d'exécution raisonnable.

Chapitre 3

Génération semi-automatique : interactions humaines

Sommaire

3.1	Objectifs et problématique	72
3.2	Taxonomie et hiérarchisation des erreurs	74
3.2.1	Analyse des résultats du traitement automatique	74
3.2.2	Création d'une taxonomie	76
3.2.3	Classification des erreurs	78
3.3	Détection et enregistrement des erreurs	80
3.3.1	Méthodologie de détection	80
3.3.2	Extension de l'IfcLight	83
3.4	Corrections par les utilisateurs	85
3.4.1	Processus général	85
3.4.1.1	Correction de la forme extérieure du bâtiment	85
3.4.1.2	Correction des éléments intérieurs du bâtiment	87
3.4.2	Corrections et actions des utilisateurs	88
3.4.2.1	Corrections guidées pour l'utilisateur	89
3.4.2.2	Dessiner des éléments	91
3.5	Résultats de l'évaluation de performance	93
3.5.1	Exemples de reconstruction semi-automatique	93
3.5.2	Évaluation au niveau des pixels	96
3.5.3	Évaluation du bâtiment	99
3.5.4	Analyse des interventions utilisateurs	100
3.5.4.1	Analyse des actions utilisateurs	100
3.5.4.2	Analyse des impacts des actions utilisateurs	102
3.6	Conclusion - Discussion	104

3.1 Objectifs et problématique

La méthodologie exposée dans le chapitre 2 a permis d’aboutir au développement et à la validation du processus de conversion automatique de plans papiers 2D scannés vers des maquettes numériques 3D de bâtiment. Les résultats obtenus lors d’une première phase de tests sont encourageants et permettent de valider le processus développé. Cependant, les tests réalisés montrent qu’un certain nombre d’erreurs et d’incohérences sont présentes dans les maquettes numériques finales. Ces erreurs ont la particularité d’être dues à des spécificités du plan et il est alors impossible de les corriger automatiquement car elles sont difficilement généralisables.

Par exemple, certains éléments ne sont pas identifiés dans le plan tels que des ouvrants et des confusions sont faites entre murs extérieurs et intérieurs. Certaines formes extérieures des bâtiments ne sont pas fermées géométriquement et topologiquement ce qui rend la maquette numérique inexploitable car incomplète.

Afin de lever ce verrou, une solution est d’améliorer la méthodologie précédente pour la rendre plus robuste. Par exemple, les paramètres utilisés lors de l’extraction des primitives géométriques dans l’image peuvent être modifiés afin de rendre les tests de validation plus ou moins restrictifs. Des outils d’apprentissage de reconnaissance de formes pourraient également être développées, la principale difficulté est liée à la diversité de représentations et de configurations des plans architecturaux.

Cependant, une telle approche nécessite de déterminer pour chaque plan les paramètres nécessaires pour reconnaître l’ensemble des éléments. Cela permettrait éventuellement, sur la base de plans tests, de réduire le nombre d’éléments manquants et d’augmenter les taux de reconnaissance. Mais cela ne garantirait pas par la suite une généricité de l’outil car la méthodologie serait trop spécifique aux données tests.

De plus, si on multiplie le nombre de règles appliquées sur les éléments du bâtiment, l’approche deviendrait là aussi trop spécifique à un type de plan particulier et le risque d’avoir un processus donnant des résultats excellents sur un ensemble de plans de la base mais beaucoup moins bons sur les autres plans est élevé. Développer un système tout automatique pouvant analyser tout type de plans est difficilement réalisable en raison de la diversité de représentations graphiques et de configurations existantes de bâtiments.

L’approche que nous avons choisie de développer se veut être un compromis entre la complétude de la maquette numérique générée et le temps de la reconstruction. En effet, une reconstruction entièrement manuelle permet d’atteindre une qualité quasiment parfaite de la maquette numérique alors qu’une reconstruction automatique offre un gain de temps considérable mais une qualité moindre.

C’est pourquoi, nous proposons une méthodologie pour générer semi-automatiquement des maquettes numériques de bâtiments existants grâce à l’intégration d’interventions utilisateurs. L’enjeu principal est de faire intervenir l’utilisateur le moins possible pendant le processus pour conserver le gain de temps acquis en automatique. La reconstruction semi-automatique permet alors de mieux concilier le temps d’exécution avec la qualité de la reconstruction.

Peu de travaux traitent de l’intégration des utilisateurs dans le processus de reconnaissance d’un document numérique de type plan architectural. Cependant, l’utilisateur

a dans certains cas un rôle comme pour Dominguez et al.[61] qui proposent un outil semi-automatique pour la détection de la topologie à partir de fichiers vectoriels CAD. L'utilisateur peut corriger la précision géométrique lorsque deux segments sont en intersection, modifier les paramètres de l'algorithme de détection automatique ou encore sélectionner les calques correspondants aux différents objets identifiés dans le plan. Cependant, son rôle n'est pas central car ses actions se déroulent lors de la phase préliminaire avant la reconnaissance automatique.

Dans d'autres approches, l'utilisateur est sollicité pour vérifier et modifier les mots détectés lors de la phase de traitement des éléments textuels afin de corriger les erreurs commises lors de la reconnaissance des caractères pour valider l'information sémantique [72].

Enfin, des travaux ont montré l'importance de détecter et de corriger les erreurs effectuées par un architecte lors de la phase de conception d'un bâtiment afin d'éviter leurs propagations [51]. Ces outils d'aide à la conception sont directement utilisés pendant le processus. Par exemple, pour dimensionner une poutre sur trois supports, une des erreurs qui peut arriver est d'utiliser la formule de calcul pour deux supports. Les erreurs détectées dans ces travaux sont différentes de celles produites lors de la reconnaissance automatique d'un document numérique. Néanmoins, le risque de propagation d'erreurs est également à prendre en compte lors de la reconstruction d'une maquette numérique car tous les éléments sont liés les uns par rapport aux autres, d'où l'intérêt de pouvoir rapidement les identifier et les corriger correctement.

Dans l'approche que nous proposons, la problématique principale est de limiter le nombre d'interventions humaines afin de conserver un temps d'exécution raisonnable. Le principe est donc de solliciter ponctuellement l'utilisateur lors du processus de conversion pour valider certaines étapes, choisir une option quand le système ne dispose pas des informations requises ou encore redessiner quelques éléments sur le plan si nécessaire.

Pour cela nous proposons une méthodologie de classification des erreurs et un travail sur les corrections suggérées à l'utilisateur en fonction de l'erreur et de la configuration du bâtiment. Le processus est entièrement guidé pour que l'utilisateur prenne la décision la plus adaptée en un temps minimum. La figure 3.1 reprend le schéma général de reconversion automatique d'un plan 2D scanné en maquette numérique présenté dans le chapitre 1 en y intégrant notre proposition.

Dans ce chapitre, nous présentons l'étude réalisée pour créer une classification des erreurs courantes préalable à la mise en place d'une méthodologie pour générer une maquette numérique de façon semi-automatique. Des tests sur la même base de plans que celle utilisée pour le chapitre précédent ont également été réalisés. Ils mettent en évidence l'intérêt d'un tel système afin de concilier le temps de reconstruction avec la qualité des maquettes numériques finales.

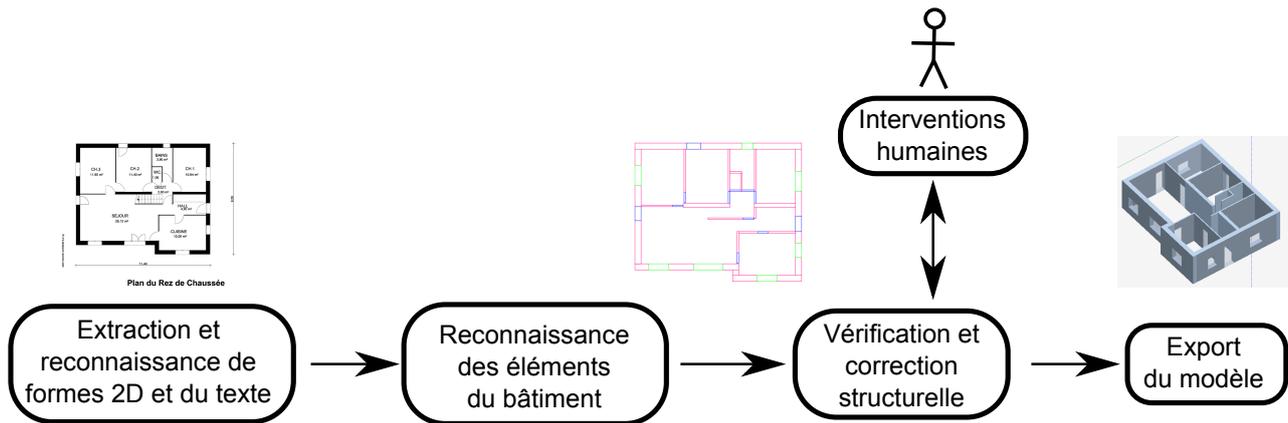


FIGURE 3.1 – Schéma général de conversion d'un plan 2D en BIM enrichi avec notre proposition. Des interventions humaines peuvent avoir lieu pendant la phase de vérification et de validation avant l'export 3D.

3.2 Taxonomie et hiérarchisation des erreurs

3.2.1 Analyse des résultats du traitement automatique

Une analyse des erreurs a tout d'abord été effectuée afin de déterminer le type d'erreurs et leur fréquence pour identifier celles à prendre en compte en priorité lors de la correction. En effet, si une erreur n'apparaît que dans un ou deux plans elle est moins représentative qu'une erreur qui apparaît plus fréquemment. Les principales erreurs relevées dans la base de plans ont différentes caractéristiques :

1. Des problèmes de topologie causés par des murs extérieurs n'ayant qu'un seul ou aucun lien topologique avec un autre mur extérieur ainsi que des murs isolés.
2. Des intersections fausses entre éléments du bâtiment. Elles sont de trois types : intersection entre deux murs, entre un ouvrant et un mur ou alors entre deux ouvrants.
3. Des éléments manquants tels que des ouvrants ou des murs.
4. Des confusions sémantiques entre un mur extérieur et un mur intérieur ou entre une porte et une fenêtre.
5. Des formes extérieures de bâtiment qui sont ouvertes topologiquement ou géométriquement alors qu'elles doivent former un polygone fermé de murs extérieurs continus.
6. Des éléments inexistants générés pendant la reconnaissance automatique alors qu'ils ne sont pas représentés dans le plan tels que des murs ou des ouvrants.

Le graphique de la figure 3.2 représente pour chaque erreur le nombre de plans dans lesquels elle apparaît. Ces relevés ont été effectués sur la base des 90 images déjà utilisées précédemment. Pour une meilleure lisibilité, les erreurs sont triées en fonction de leur fréquence d'apparition.

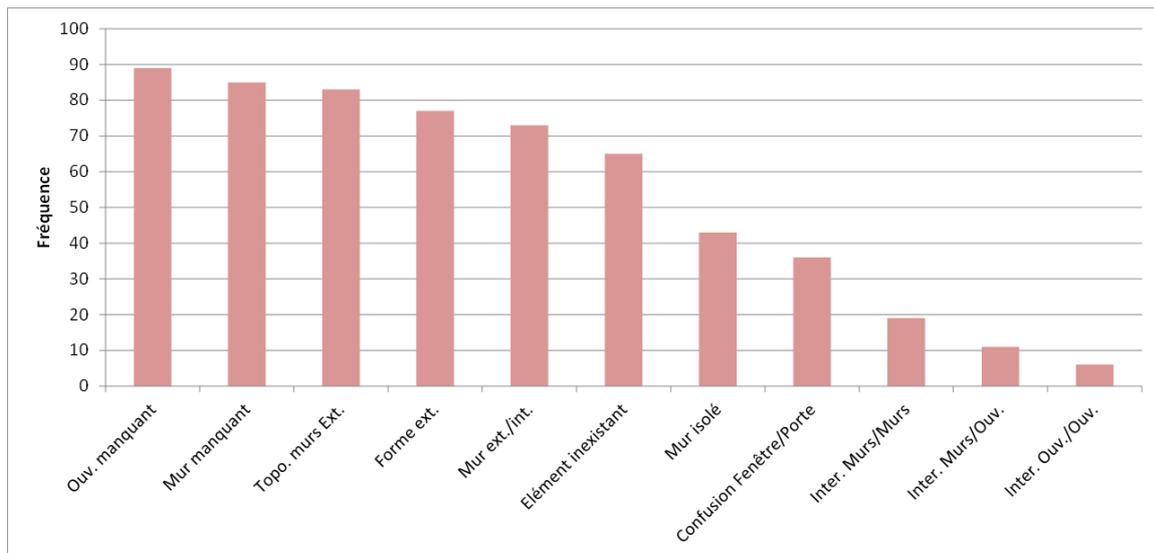


FIGURE 3.2 – Graphique représentant pour chaque erreur le nombre de plans dans lesquels elle apparaît au minimum une fois.

L'erreur la plus récurrente concerne des ouvrants manquants dans les plans, seul un plan les contient tous. Cette erreur est fortement liée au fait qu'au moins un mur est manquant dans 85 plans sur 90. En effet, si un mur manquant contient des ouvrants alors les ouvrants sont aussi manquants. Dans une majorité de cas (77 plans), la forme extérieure du bâtiment n'est pas fermée, cela est principalement dû à la présence de murs extérieurs n'ayant qu'un seul lien topologique avec un autre mur extérieur.

Des confusions sémantiques sont aussi présentes entre des murs extérieurs et intérieurs (73 plans sont concernés) ce qui est là aussi directement lié à la reconstruction de la forme extérieure. En effet, un mur extérieur est converti automatiquement en un mur intérieur lorsqu'il n'est relié à aucun autre mur extérieur à la fin du processus de reconnaissance. De plus si un mur est de type intérieur au lieu d'extérieur, la recherche d'ouvrants ne sera pas la même. Les tests de validation sur les murs intérieurs étant plus restrictifs, le mur peut également être supprimé.

La figure 3.3 illustre le cas particulier où un mur extérieur avec une topologie incomplète entraîne d'autres erreurs lors de la reconnaissance. Le mur rouge (A) et le mur horizontal au milieu à droite (B) n'ont pas pu être connectés lors de la reconstruction de la forme extérieure.

En effet, la longueur du mur B est incorrecte et il n'intersecte pas le mur A. C'est pourquoi aucun point topologique n'a pu être créé entre les deux éléments car il n'y a pas de recouvrement. Ainsi, le mur B n'a pas été mis en relation avec un mur extérieur et il est converti en mur intérieur (d'où sa couleur bleue). De plus, sur cet exemple, la porte extérieure C n'est pas non plus identifiée car un ouvrant doit être inclus dans un mur.

Sur cet extrait on identifie quatre erreurs distinctes : un ouvrant manquant, une erreur de sémantique avec un mur extérieur labellisé comme un mur intérieur, une topologie incomplète pour le mur extérieur rouge et la forme extérieure du bâtiment qui est ouverte. Toutes ces erreurs sont liées au fait qu'un mur a été mal reconnu.

Pour au moins 30% des plans, des confusions sémantiques sont présentes au sein des

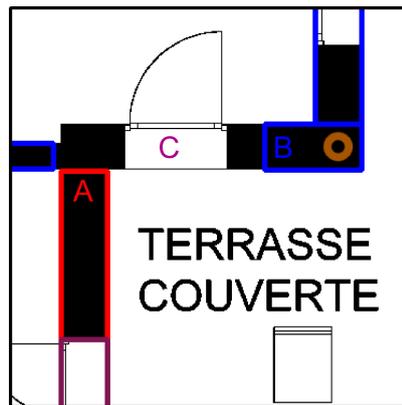


FIGURE 3.3 – Exemple d’erreurs multiples et liées sur un même plan. La mauvaise reconnaissance du mur B entraîne plusieurs erreurs : forme extérieure du bâtiment ouverte, absence de liens topologiques entre le mur A et B, porte C non identifiée.

ouvrants lors de la distinction des portes et des fenêtres. Moins d’un tiers des plans sont concernés par des intersections mal définies, le plus souvent géométriquement, entre éléments : intersection entre murs, entre ouvrants ou entre un mur et un ouvrant.

De plus, on note que des éléments inexistants sont générés dans 65 plans sur les 90 de la base. Ces éléments sont généralement des murs et des ouvrants mais leur taille varie fortement en fonction des plans. Sur certains plans, seul un morceau de mur ou une porte intérieure seront générés alors que dans d’autres cas des murs entiers sont inexistants ce qui peut entraîner des incohérences dans la maquette numérique.

Une des conclusions principales que l’on peut extraire à partir de ce relevé d’erreurs concerne la forte dépendance entre chacune. En effet, si des murs extérieurs n’ont pas une topologie complète alors la forme extérieure du bâtiment n’est pas fermée. Des murs manquants entraînent des ouvrants manquants et des murs extérieurs qui n’auront pas une topologie complète et ainsi de suite. Afin de mieux comprendre les liens entre ces erreurs et leurs impacts sur la reconnaissance, nous avons décidé de définir une taxonomie puis une classification de ces erreurs à partir de ce relevé.

3.2.2 Création d’une taxonomie

Une taxonomie permet de représenter par un arbre hiérarchisant les relations de dépendance entre les éléments selon des caractéristiques précises. La taxonomie présentée ici classe les erreurs relevées précédemment par rapport à leurs propriétés géométriques, topologiques et sémantiques. Une erreur peut dépendre d’une ou plusieurs composantes.

La figure 3.4 représente la taxonomie déduite des erreurs rencontrées précédemment. Les deux erreurs à gauche représentent celles pouvant dépendre des trois composantes : les éléments inexistants dans le plan d’origine et ceux manquants. Les erreurs situées à droite sont celles dépendant d’une ou deux composantes simultanément.

Par exemple, une mauvaise distinction entre murs intérieurs et extérieurs est une erreur de type sémantique qui peut dépendre en partie de la topologie du mur. La forme extérieure d’un bâtiment est ouverte lorsque sa topologie ou sa géométrie est mal définie.

En règle générale, une erreur de type géométrique entraîne le plus souvent des erreurs topologiques et réciproquement.

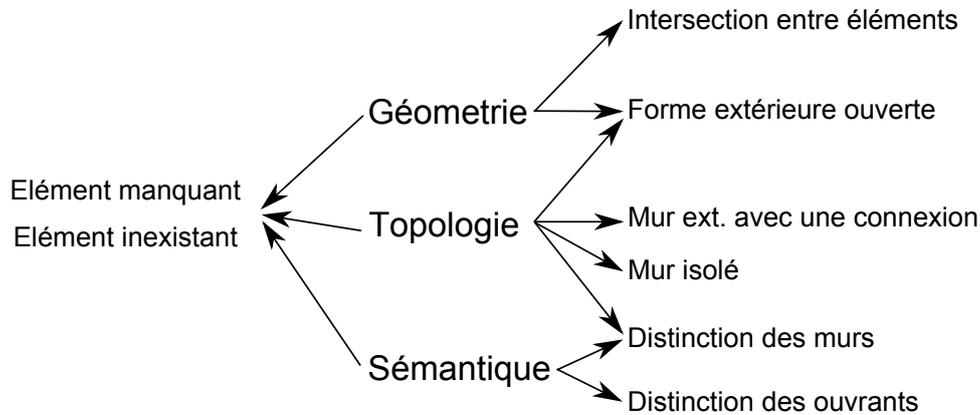


FIGURE 3.4 – Taxonomie des erreurs en fonction des trois composantes : topologie, géométrie et sémantique.

Les huit erreurs principales ont été représentées dans cette classification et permettent de décrire les erreurs rencontrées lors de l’analyse précédente. Par rapport au graphique de la figure 3.2, toutes les intersections possibles entre éléments ont été regroupées en une seule catégorie d’erreur, de même que pour les éléments manquants ce qui explique le nombre réduit d’erreurs.

Cette classification met en évidence l’importance des trois composantes ainsi que le lien entre chacune d’entre elles. En effet, si une des composantes pour un élément est mal définie, cela a des conséquences sur ses deux autres composantes d’où une propagation de l’erreur. C’est pourquoi, il est important de pouvoir corriger rapidement les erreurs en impliquant d’autres.

La figure 3.5 est une représentation des causalités entre erreurs. Chaque flèche indique que l’erreur pointée peut dépendre de l’élément précédent. Par exemple, un mur manquant peut avoir un impact sur la reconstruction de la forme extérieure du bâtiment, la reconnaissance des ouvrants et l’identification des espaces. Une mauvaise distinction sémantique entre murs intérieurs et extérieurs peut être la cause d’ouvrants manquants ce qui a une influence sur la reconnaissance des espaces.

Elle illustre également le fait que toutes les erreurs sont liées les unes aux autres et qu’il faut alors mettre en place un processus pour déterminer celle(s) à corriger en priorité, c’est à dire celle(s) dont la correction entrainera la suppression d’une ou plusieurs autres erreurs.

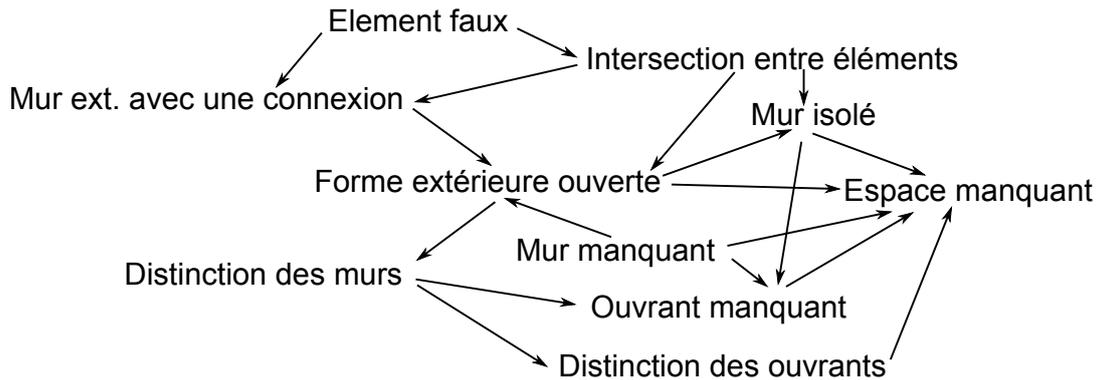


FIGURE 3.5 – Graphe modélisant les liens entre erreurs. Une flèche entre deux erreurs indique le sens de la dépendance.

En étudiant ce graphe, il est difficile de déterminer les erreurs les plus importantes et la stratégie à adopter lors de la correction. Cette représentation est insuffisante pour caractériser chaque erreur car elles peuvent être dépendantes de une ou plusieurs erreurs qui ont elles aussi des liens avec d'autres. Nous avons alors réalisé une classification de ces erreurs afin d'évaluer plus finement l'impact de chaque erreur sur la reconstruction de la maquette numérique.

3.2.3 Classification des erreurs

Pour chaque type d'erreur relevée lors de l'analyse des tests réalisés en automatique, nous avons cherché à évaluer son impact sur la reconnaissance du plan et la reconstruction de la maquette numérique. Or, l'impact d'une erreur est dépendant du domaine d'application dans lequel la maquette numérique est utilisée. C'est pourquoi, une note évaluant la criticité de l'erreur a été calculée pour chaque erreur en tenant compte de l'application finale de la maquette numérique, dans notre cas : la simulation thermique.

Les quatre critères suivants ont été définis pour évaluer l'impact d'une erreur. Les deux premiers critères sont liés à la cohérence de la maquette numérique et sont plus génériques que les deux derniers qui sont directement dépendants de l'application.

1. Impact sur l'intégrité fonctionnelle du bâtiment.
2. Degré de dépendance de l'erreur par rapport aux autres.
3. Impact sur la simulation énergétique.
4. Impact sur la reconstruction des espaces.

Pour chaque erreur, la gravité de l'impact est évaluée en attribuant pour chaque critère une note de 0 à 2 : 0 si l'erreur n'a aucun impact sur le critère évalué, 1 si l'impact est modéré et 2 si l'erreur a un fort impact sur le critère. Ensuite, une note finale est calculée en sommant les différentes notes obtenues pour chaque critère, ce qui donne une criticité comprise entre 0 et 8. Plus cette note est élevée et plus l'erreur est importante et doit être corrigée en priorité.

Il est important de noter que ces critères ont été choisis en fonction des perspectives d'utilisations futures de la maquette numérique et qu'ils peuvent être adaptés à d'autres cas d'applications. Par exemple, le quatrième critère est directement lié aux contraintes

d'une simulation énergétique où les pièces doivent être décrites précisément afin d'évaluer les zones thermiques.

TABLE 3.1 – Tableau de classification des erreurs par calcul d'un score basé sur l'impact de l'erreur par rapport à différents critères évalués chacun de 0 à 2.

Erreurs/Impact	Cohérence structurelle		Application		Total (/8)
	Intégrité fonctionnelle du bâtiment	Degrés de dépendance	Simulation énergétique	Reconstruction d'espaces	
1. Intersection Ouv./Ouv.	1	0	0	0	1
2. Intersection Mur/Ouv.	1	0	0	1	2
3. Mur isolé	1	1	0	1	3
4. Intersection Mur/Mur	1	1	1	0	3
5. Fenêtre manquante	1	1	2	0	4
6. Confusion porte/fenêtre	1	1	1	2	5
7. Faux ouvrant	2	1	2	1	6
8. Faux mur	2	1	2	2	7
9. Mur ext. topo. incomplète	2	2	1	2	7
10. Porte manquante	2	2	2	2	8
11. Mur manquant	2	2	2	2	8
12. Forme ext. ouverte	2	2	2	2	8

Le tableau 3.1 récapitule le descriptif et le score obtenu par chaque erreur classée selon l'impact global du plus faible au plus élevé. Il met en évidence les erreurs les plus critiques lors de la reconstruction qui sont les éléments manquants (porte et mur) ainsi que la forme extérieure du bâtiment qui est ouverte. Cette dernière nous semble la plus critique pour la reconstruction de la structure du bâtiment et pour la réalisation de simulation énergétique car tous les éléments intérieurs et les ouvrants sont positionnés par rapport aux murs formant la forme extérieure. Si elle n'est pas correcte, le risque de générer d'autres erreurs par la suite est élevé.

D'autres erreurs ont un impact moins élevé telles que des murs isolés ou des intersections entre murs mais ont tout de même un impact non négligeable sur le résultat final et le plus souvent sur la forme extérieure.

La génération d'éléments faux dans le plan est aussi critique lors de la reconstruction 3D car il s'agit d'éléments qui ont une note critique élevée, comprise entre 6 et 7, et il est difficile de détecter automatiquement ou grâce à un utilisateur ces erreurs pour les corriger. Elles impactent fortement la cohérence structurelle du bâtiment et peuvent entraîner des incohérences lors de simulations énergétiques.

Le travail d'analyse des résultats obtenus suite à des tests effectués en phase automatique a permis de mettre en évidence les erreurs les plus critiques. Une méthodologie de correction semi-automatique se focalisant dans un premier temps sur les erreurs concernant la génération de l'enveloppe externe du bâtiment a donc été développée.

3.3 Détection et enregistrement des erreurs

Grâce à l'analyse effectuée dans la section précédente, les principales erreurs rencontrées lors de la conversion automatique des images de plans en maquette numérique 3D ont pu être répertoriées et classifiées suivant leurs impacts. L'étape suivante consiste à les identifier automatiquement lors du processus de reconnaissance afin de les corriger pour éviter leur éventuelle propagation et générer une maquette numérique cohérente.

Les erreurs rencontrées peuvent être classées en deux catégories : celles qui sont détectables automatiquement et celles qui ne le sont pas. Afin de détecter un maximum d'erreurs lors des traitements, des tests complémentaires ont été ajoutés lors des étapes clefs du processus pour identifier et enregistrer les erreurs. Pour réaliser ce traitement, une extension du modèle IfcLight, présenté dans le chapitre précédent, a été effectuée afin d'enregistrer chaque erreur comme un objet et de l'associer avec les éléments du bâtiment impactés.

3.3.1 Méthodologie de détection

La recherche et l'identification des erreurs sont effectuées lors de la reconstruction de la maquette numérique afin d'éviter la présence d'incohérences sur la structure du bâtiment et de limiter la génération d'éléments inexistants. Cette phase est en effet décisive lors de la reconstruction car elle constitue le cœur des traitements. Tous les éléments du bâtiment identifiés dans les phases précédentes sont alors corrigés géométriquement, les liens entre éléments sont validés et enregistrés grâce à la définition précise des points topologiques. L'information sémantique est elle aussi déterminée en différenciant notamment les éléments intérieurs et extérieurs ainsi que les portes et les fenêtres.

C'est lors de cette étape clef que les éléments du bâtiment peuvent être vérifiés afin d'identifier les incohérences et les erreurs commises pour les corriger. Pour rappel, l'étape de reconstruction de la maquette numérique comporte trois phases :

1. La recherche de la forme extérieure du bâtiment : tous les murs extérieurs sont combinés pour reconstruire l'enveloppe externe du bâtiment qui doit être fermée géométriquement et topologiquement. Une fois cette enveloppe validée, les ouvrants extérieurs sont recherchés.
2. La reconstruction intérieure du bâtiment. Les murs intérieurs sont eux aussi validés et les portes intérieures sont recherchées dans le plan.
3. La recherche d'espaces dans la maquette numérique à partir des informations définies lors des deux premières étapes. Lors de cette étape, les murs et les ouvrants sont considérés comme validés et ne sont plus modifiés.

La recherche d'erreurs est réalisée lors des deux premières étapes de la reconstruction. La figure 3.6 décrit le processus détaillé de la phase de reconstruction de la maquette numérique en incluant les phases de tests envisagées. Ce choix se justifie par le fait que lors de la recherche d'espaces, les éléments du bâtiment sont considérés fixes selon la méthodologie précédemment définie. Il est plus judicieux de réaliser des corrections en amont de cette phase quand il est encore possible de supprimer ou de modifier des éléments du bâtiment.

Deux phases de tests sont prévues. La première se déroule juste après la reconstruction de la forme extérieure du bâtiment afin de valider tous les éléments extérieurs. La deuxième phase de tests est réalisée à l'issue de la reconstruction intérieure du bâtiment pour valider cette fois-ci l'ensemble des éléments intérieurs.

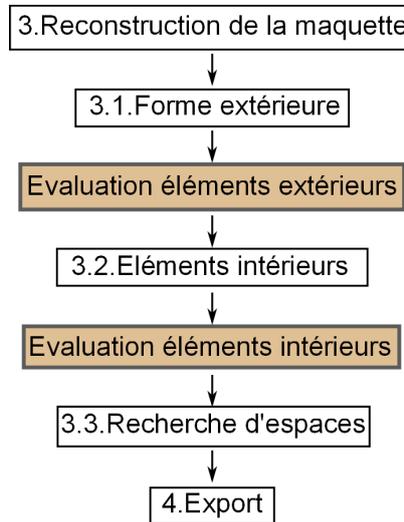


FIGURE 3.6 – Adaptation du schéma de reconnaissance automatique par l'ajout de deux phases d'évaluation lors de l'étape de reconstruction de la maquette numérique.

Les résultats obtenus lors de la conversion automatique d'images de plans scannés en maquette numérique ont mis en évidence le fait qu'un nombre élevé d'éléments intérieurs ne sont pas reconnus dans le plan. C'est pourquoi, la deuxième phase de tests est plus axée sur la recherche d'éléments potentiels et notamment les portes intérieures. L'évaluation effectuée après la reconstruction de la forme extérieure du bâtiment est plus axée sur les éléments existants et notamment les murs extérieurs.

A la fin du processus de reconstruction de la forme extérieure, une première série de tests va donc permettre de mettre en évidence les incohérences générées et plus précisément les erreurs concernant les murs extérieurs. Trois tests sont alors réalisés afin de valider ou non l'enveloppe externe du bâtiment :

1. Vérification du nombre de liens topologiques de chaque mur extérieur. Si un mur extérieur est en relation avec moins de deux autres murs extérieurs alors l'erreur *Mur ext. topo. incomplète* est générée en enregistrant le mur concerné.
2. Validation de la géométrie entre deux murs en lien. Deux murs ont effectivement un lien topologique si ils ont au minimum un pixel en commun. C'est à dire qu'il y a recouvrement partiel entre les deux. Si cela n'est pas le cas, l'erreur *Intersection Mur/Mur* est générée pour indiquer que la liaison est géométriquement incorrecte.
3. Test pour déterminer si la forme extérieure est fermée topologiquement et géométriquement. Ce test est réalisé grâce au graphe topologique en considérant seulement les murs extérieurs. Si ceux-ci forment un cycle fermé alors la forme externe du bâtiment est validée. Sinon l'erreur *Forme ext. ouverte* est générée.
4. Validation de la distinction sémantique entre porte et fenêtre. Pour chaque ouvrant, sa largeur d'ouverture est comparée avec des valeurs standards. Si une porte

n'est pas conforme aux valeurs de référence alors il s'agit peut-être d'une fenêtre. Suivant la charte graphique utilisée pour dessiner le plan d'origine, des recherches de symboles complémentaires peuvent également être réalisées. Si une incohérence est rencontrée, l'erreur *Confusion porte/fenêtre* est générée.

Une fois la reconstruction intérieure du bâtiment réalisée, des tests sont également effectués avec la particularité de rechercher des éléments manquants et de repérer les éléments inexistant. Pour cela, les vérifications suivantes sont réalisées :

1. Si un mur intérieur est en intersection avec un ouvrant alors qu'il ne s'agit pas du mur de référence pour l'ouvrant, une erreur *Intersection Mur/Ouv.* est générée. Si deux ouvrants présentent une intersection quelles que soient leurs propriétés sémantiques alors une erreur *Intersection Ouv./Ouv.* est générée. De même que pour la phase de tests précédente, les intersections entre murs sont également vérifiées.
2. Afin de rechercher d'éventuels murs manquants, des tests sont effectués pour vérifier que deux murs intérieurs dans un voisinage commun ne sont pas en relation topologique. Suivant la configuration des deux murs, une erreur *Intersection Mur/Mur* est générée si les murs sont en intersection sans lien topologique ou alors *Mur manquant*.
3. Une recherche d'emplacement probable de portes intérieures entre deux murs intérieurs parallèles et distants est réalisée. Si la distance séparant les deux murs est proche de la largeur d'ouverture d'une porte intérieure alors une erreur *Porte manquante* est générée. Ce cas apparaît pour des pièces de petite surface lorsque la longueur du mur est identique à celle d'ouverture de porte. Le mur n'est alors pas représenté dans le plan car il est confondu avec la porte.

La figure 3.7 présente deux exemples d'erreurs relevées lors des phases de validation des éléments extérieurs puis intérieurs. La première est l'identification d'une porte manquante entre deux murs intérieurs et la deuxième est relevée après la phase de reconstruction de la forme extérieure pour un mur extérieur ayant une topologie incomplète.

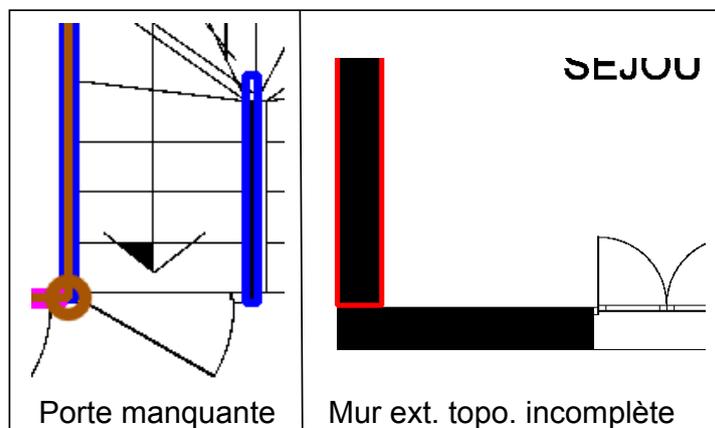


FIGURE 3.7 – Exemple de deux erreurs relevées. Celle de gauche pendant la phase de validation des éléments intérieurs et celle de droite est identifiée lors de la phase de validation des éléments extérieurs.

Tous ces tests permettent d'identifier au fur et à mesure de la reconstruction de la maquette numérique les erreurs et incohérences possibles. A ce stade, aucune correction n'est pour l'instant appliquée, les erreurs sont seulement identifiées. En effet, la méthode appliquée permet de détecter des incohérences dont les corrections ne peuvent être que manuelles. Afin d'enregistrer correctement ces erreurs, une extension du modèle interne de données présenté dans le chapitre 2 (cf. figure 2.17) a été réalisée.

3.3.2 Extension de l'IfcLight

Chaque erreur est rattachée à un ou plusieurs éléments du bâtiment générés pendant la reconnaissance. Par exemple, une erreur d'intersection entre deux murs impliquent les deux murs pour lesquels l'intersection est mal définie. Lors de la phase de correction, les erreurs sont manipulées, modifiées ou supprimées au fur et à mesure des changements opérés sur la maquette numérique. C'est pourquoi, une erreur doit être un objet à part entière, reliée aux éléments du bâtiment concernés afin de faciliter le processus de correction. Une erreur est définie de la façon suivante :

$$E = \{ \textit{identifiant}, \textit{code}, \{ B_i \}_{i=0..n} \} \quad (3.1)$$

Une erreur contient les informations suivantes : un identifiant, un code et l'ensemble des identifiants des éléments du bâtiment impactés par cette erreur (mur, ouvrant, espace). L'identifiant permet de rendre l'erreur unique. Le code de l'erreur est une information capitale, il permet de déterminer le type de l'erreur : 12 si la forme extérieure du bâtiment est ouverte, 4 si une intersection entre deux murs est détectée, etc (cf. tableau 3.1).

Suivant son code, l'erreur ne sera pas gérée de la même façon et des règles spécifiques seront appliquées. Par exemple, l'erreur sur la forme extérieure concerne l'ensemble des murs extérieurs du bâtiment alors qu'une intersection entre un ouvrant et un mur est seulement valable pour deux éléments du bâtiment. De plus, une mise à jour régulière des erreurs est faite au cours des traitements car les erreurs étant dépendantes les unes des autres, la suppression d'une erreur peut entraîner la modification d'autres erreurs.

Afin d'enregistrer les erreurs relevées durant la conversion de l'image de plan en maquette numérique 3D de bâtiment, l'IfcLight qui est le modèle de données interne de bâtiment présenté précédemment a été adapté par l'ajout d'une nouvelle classe. Elle permet une généralisation des éléments du bâtiment pour une meilleure modélisation. La figure 3.8 est le nouveau diagramme de classes du modèle IfcLight, la nouvelle classe est représentée en bleu.

La classe abstraite *ElementBati* est héritée par les classes *Ouvrant*, *Mur* et *Espace*. Cette classe contient peu d'attributs. Dans l'architecture logicielle développée, elle est directement en lien avec la classe *Erreur* et a l'avantage de mettre en relation les éléments et leurs erreurs associées.

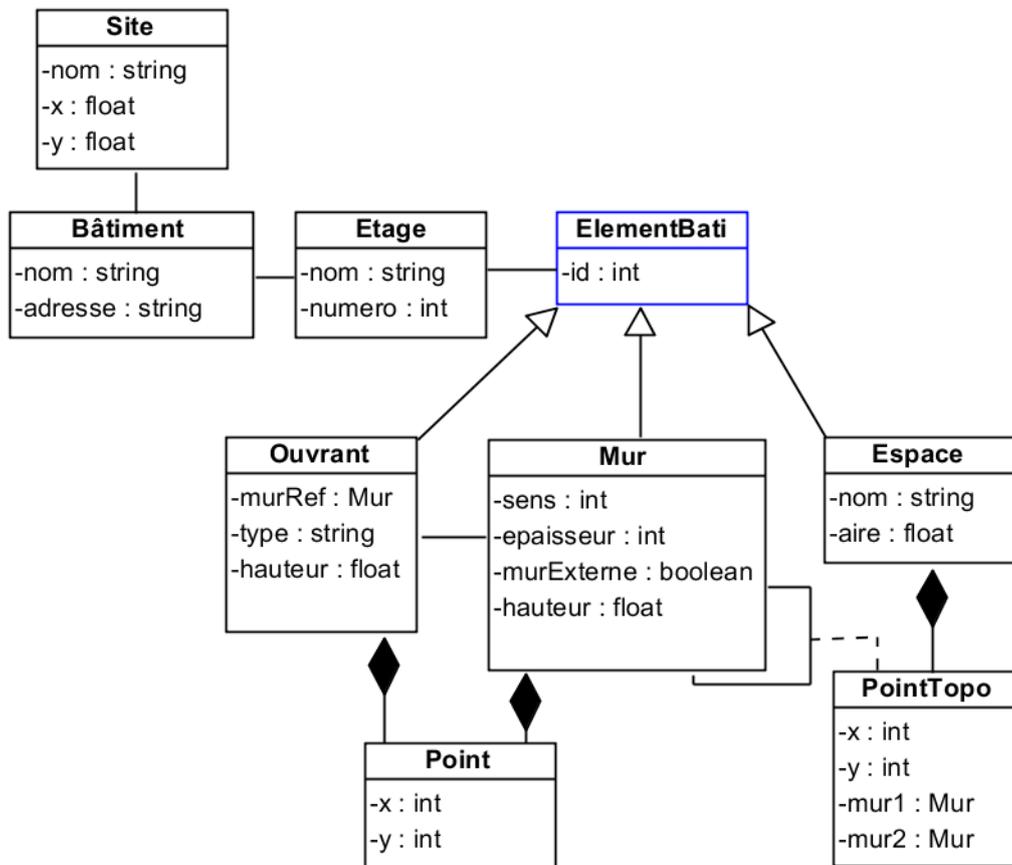


FIGURE 3.8 – Extension du modèle de données interne utilisé l’IfcLight pour intégrer la classe abstraite *ElementBati* qui gère l’ensemble des éléments du bâtiment.

Cette nouvelle classe permet aussi de rendre le modèle plus flexible à l’ajout de nouvelles classes et surtout de nouvelles erreurs. Si par la suite de nouveaux éléments du bâtiment sont reconnus et intégrés à la maquette tels que des escaliers, il suffira alors de créer une nouvelle classe fille de *ElementBati* sans avoir à modifier l’ensemble du modèle. De plus, l’ajout de nouvelles erreurs est aussi simplifié car une erreur n’est pas liée à un type d’élément particulier du bâtiment.

Les principales erreurs commises lors de la phase de conversion d’un plan 2D scanné en maquette numérique 3D de bâtiment ont été analysées et classées. Une méthodologie de détection a été présentée afin de les intégrer dans le processus mis en place. L’étape suivante est celle qui va permettre le traitement et la correction de ces erreurs afin qu’elles n’entraînent pas la propagation de nouvelles erreurs.

3.4 Corrections par les utilisateurs

Dans cette section, nous présentons la méthodologie mise en place pour intégrer l'utilisateur dans la création de la maquette numérique afin qu'il corrige les erreurs relevées précédemment. La particularité de notre approche est de guider l'utilisateur afin qu'il ait seulement à effectuer des tâches ponctuelles et ciblées grâce à un mécanisme de correction spécifique proposant automatiquement des choix de correction à l'utilisateur qui sont détaillés dans la section 3.4.2.

3.4.1 Processus général

Suivant le code d'une erreur ainsi que sa criticité déterminée par la note d'impact calculée précédemment, il n'est pas forcément nécessaire de la corriger dès qu'elle est détectée. La classification créée dans la section précédente permet de déterminer le moment de correction de l'erreur par sa position dans la liste ordonnée selon la criticité.

De plus, la liste des erreurs doit être mise à jour après chaque modification car la correction d'une erreur entraîne potentiellement la suppression d'autres erreurs. Dans cette partie, nous présentons deux phases de correction : celle réalisée lors de la reconstruction de la forme extérieure et celle lors de la reconstruction intérieure du bâtiment.

3.4.1.1 Correction de la forme extérieure du bâtiment

La forme extérieure du bâtiment est validée lorsqu'elle est constituée par un ensemble de murs extérieurs formant un cycle fermé topologiquement et géométriquement. Ce critère est utilisé pour déterminer la fin de la phase de correction. Le processus de correction de la forme extérieure du bâtiment est représenté dans la figure 3.9.

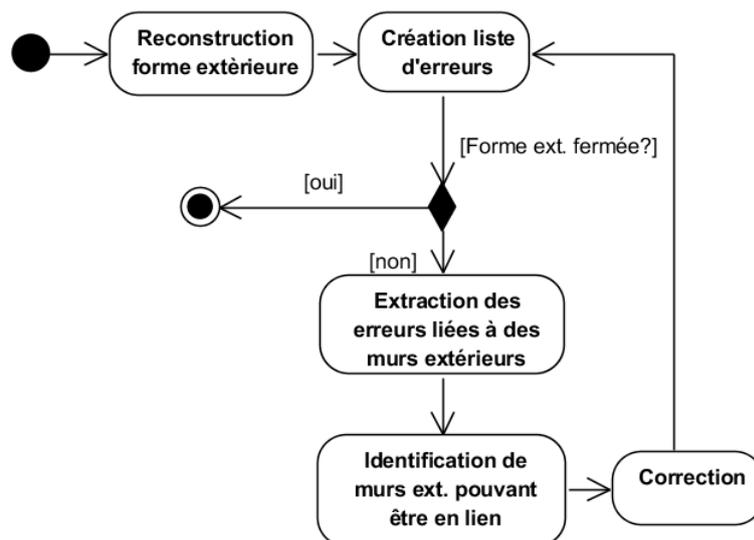


FIGURE 3.9 – Diagramme de correction de la forme extérieure du bâtiment.

Des tests de validation sont réalisés après la phase de reconstruction de la forme extérieure pour identifier les éventuelles erreurs commises sur les éléments extérieurs du

bâtiment. Si la forme extérieure du bâtiment est ouverte, une phase de correction est nécessaire.

La phase de correction suit un processus itératif qui se termine lorsque la forme extérieure du bâtiment est fermée. Lors de cette étape, seules les erreurs impliquant des murs extérieurs sont prises en compte dans le processus car le but est de générer l'enveloppe externe du bâtiment.

A chaque itération, les erreurs relatives aux murs extérieurs sont extraites de la liste d'erreurs. Les murs extérieurs concernés sont ceux ayant au maximum un seul lien topologique avec d'autres murs extérieurs ainsi que ceux impliqués dans des intersections mal définies avec d'autres murs extérieurs.

Afin de générer les propositions faites à l'utilisateur, un algorithme a également été développé pour identifier dans l'ensemble des erreurs celles à traiter en priorité. Pour cela, une recherche est effectuée dans l'ensemble des murs comportant des erreurs pour identifier un couple de murs pouvant être mis en relation.

Une fois les deux murs identifiés, cinq propositions sont suggérées à l'utilisateur pour valider ou non la mise en relation, créer un nouveau mur ou supprimer de la forme extérieure un des deux murs extérieurs. Une fois les modifications effectuées, la liste d'erreurs est mise à jour afin de vérifier si des erreurs ont été supprimées et si de nouvelles ont été détectées. Si la forme extérieure n'est toujours pas fermée, une nouvelle itération est nécessaire sinon la phase de correction est terminée.

Lors du choix des murs à corriger, la priorité est donnée aux murs étant impliqués dans une erreur d'intersection entre murs (*Intersection Mur/Mur*). En effet, corriger ces erreurs en priorité permet dans un premier temps de valider ou non les intersections existantes avant de proposer de nouvelles relations topologiques.

Certaines intersections entre éléments génèrent des erreurs. Ces intersections sont le plus souvent mal définies géométriquement en raison d'un recouvrement entre les deux murs trop important. Parfois, les murs impliqués sont inexistantes ou mal définis sémantiquement. C'est pourquoi, les corrections des intersections entre murs permettent de supprimer les faux liens topologiques et de convertir des murs extérieurs en murs intérieurs si nécessaire.

Les corrections axées sur la recherche de liens entre murs permettent de compléter les informations topologiques des murs extérieurs et de fermer la forme extérieure du bâtiment. Lorsque deux murs étant impliqués dans une erreur topologique (*Mur ext. topo. incomplète*) sont reliés, cela entraîne lors de la mise à jour des erreurs, la suppression de deux erreurs grâce à une seule correction. En effet, une erreur est créée pour chaque mur n'ayant qu'une seule relation topologique et la fusion de deux murs supprime pour chacun cette erreur.

A partir de la liste initiale, il est difficile de prédire le nombre de corrections qui sont nécessaires pour corriger la forme extérieure du bâtiment car ce nombre est dépendant de la configuration du bâtiment, des erreurs de départ, de la qualité de la reconnaissance préalable des murs et de la phase de reconstruction. Cependant, la mise à jour en continu de la liste d'erreurs permet de suivre l'évolution des corrections et leurs impacts.

3.4.1.2 Correction des éléments intérieurs du bâtiment

En ce qui concerne les éléments intérieurs, le processus de correction n'est pas le même car la stratégie de reconstruction et d'évaluation des erreurs est différente par rapport à celle de la forme extérieure du bâtiment. Ainsi, les corrections sont focalisées sur la recherche d'éléments manquants comme des portes intérieures ou des murs. La figure 3.10 représente le processus de correction pour les éléments intérieurs.

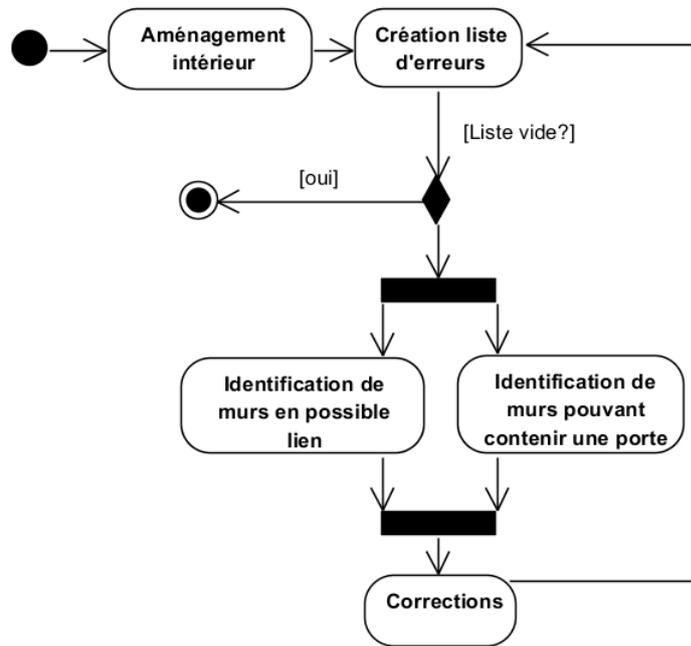


FIGURE 3.10 – Diagramme de correction des éléments intérieurs du bâtiment.

Comme pour la reconstruction de la forme extérieure, une liste initiale d'erreurs est créée. Deux types d'erreurs sont traitées afin d'éviter principalement la création d'éléments inexistantes et l'oubli d'éléments.

Les propositions de correction portent principalement sur les murs pouvant être en relation par l'intermédiaire d'une porte ou d'une intersection ainsi que les murs pouvant contenir une porte. Plusieurs propositions sont faites à l'utilisateur en fonction de l'erreur et de la configuration des éléments. Ces deux types de corrections permettent de traiter le cas où deux murs sont impliqués dans une intersection mal définie géométriquement ainsi que celui où deux murs sont dans un même voisinage sans relation alors qu'en réalité un lien topologique existe entre les deux.

A l'inverse du processus précédent, les erreurs sont généralement indépendantes les unes des autres et le système est beaucoup moins itératif. Même si la liste d'erreurs est mise à jour après chaque correction, une modification sur un ou deux murs entraîne moins de conséquences que lors de la reconstruction de la forme extérieure où l'ensemble des murs extérieurs doit répondre à des critères topologiques et géométriques spécifiques.

Cependant, il est plus fréquent lors de la reconstruction intérieure du bâtiment d'oublier des éléments car il est difficile de prévoir l'emplacement de chaque ouvrant. De plus, en raison de l'épaisseur souvent plus fine pour les murs intérieurs que pour ceux extérieurs,

certaines murs ne sont pas reconnus et il faut alors mettre en place des fonctionnalités pour que l'utilisateur puisse les ajouter.

Cependant, bien que les erreurs commises lors de la reconstruction intérieure du bâtiment soient indépendantes les unes des autres, il est important que les corrections de la forme extérieure soient effectuées avant la reconstruction des éléments intérieurs. En effet, si les murs extérieurs ne sont pas préalablement corrigés et validés, cela entraîne plus d'erreurs et d'incohérences car les éléments intérieurs sont ajustés par rapport à ceux extérieurs. Ainsi, il existe une forte dépendance entre la qualité de la reconstruction de la forme extérieure et les erreurs commises lors de la reconstruction intérieure du bâtiment.

3.4.2 Corrections et actions des utilisateurs

Les principales contraintes concernant les actions utilisateurs sont la mise en place d'interactions simples, ponctuelles et guidées. En effet, le but est de conserver le gain de temps apporté par le processus automatique tout en améliorant la qualité de la reconstruction. C'est pourquoi l'ordre des corrections a été optimisé afin de limiter le nombre d'interventions. Il est proposé un processus où l'utilisateur peut réaliser deux actions différentes :

1. Choisir une option parmi un ensemble de propositions style QCM.
2. Dessiner ponctuellement des éléments manquants sur le plan.

La première option est celle privilégiée car elle demande moins d'interactions de la part de l'utilisateur. Elle est plus rapide, plus intuitive et surtout plus guidée que la deuxième pendant laquelle il faut tout d'abord identifier les éléments manquants et les redessiner. De plus, grâce à l'analyse effectuée précédemment, il est associé à chaque erreur une cause probable et donc des pistes de solution pour la corriger.

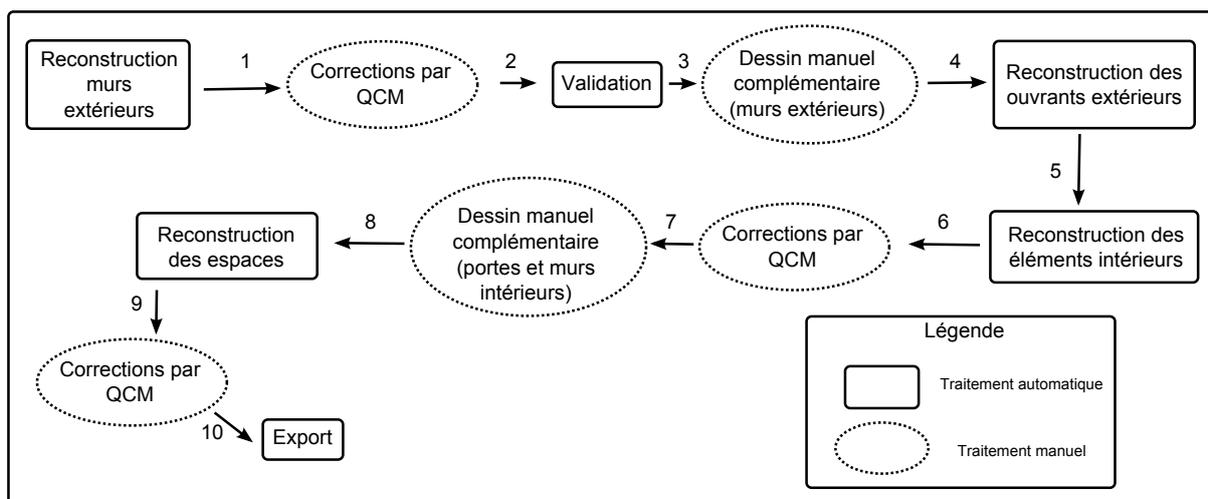


FIGURE 3.11 – Processus détaillé des interactions utilisateurs pendant la conversion.

La figure 3.11 décrit le processus mis en place. L'utilisateur est amené à intervenir durant cinq étapes de la reconstruction : trois fois pour répondre à des questions à choix

multiplés et deux fois pour dessiner des éléments manquants. Ces interventions ne sont pas systématiques et dépendent des erreurs relevées lors des divers traitements. Le nombre de questions posées à l'utilisateur dépend de la configuration du plan et des erreurs relevées. Les deux actions possibles de l'utilisateur sont décrites dans les parties suivantes.

3.4.2.1 Corrections guidées pour l'utilisateur

L'utilisateur est amené à répondre ponctuellement à des questions à choix multiples. En effet, pour chaque erreur à corriger, un ensemble de modifications de la maquette est proposé à l'utilisateur en fonction de l'erreur traitée et de la configuration des éléments. Plusieurs images permettant de visualiser les modifications possibles sur les éléments sont proposées et l'utilisateur doit alors choisir la plus appropriée. Cette méthodologie a été adoptée après une étude des erreurs générées et des actions à mener pour les corriger correctement.

Ces images sont créées grâce à un ensemble de solutions probables pour chaque erreur, décrites plus précisément ci-après. Chaque solution est appliquée sur la maquette numérique et un zoom est réalisé sur la partie modifiée de la maquette en mettant en évidence les éléments impliqués dans l'erreur. Ainsi, l'utilisateur peut directement visualiser l'impact de son choix sur la maquette et choisir plus facilement la solution la plus adaptée.

L'avantage de cette solution est que les conséquences de chaque option sont directement visibles par l'utilisateur ce qui diminue le temps de réflexion en évitant les ambiguïtés pouvant être liées à la formulation de la question. Elle permet également de proposer à l'utilisateur des questions fermées ce qui guide ses choix.

L'utilisateur est amené lors du processus global à intervenir au cours de trois phases différentes : lors de la reconstruction de la forme extérieure, de celle des éléments intérieurs et des espaces. Suivant le type d'erreur, différents choix sont proposés, comme indiqué dans le tableau suivant 3.2.

Ces actions ont été définies grâce à l'analyse des erreurs produites sur les maquettes numériques. Elles ne sont pas spécifiques à quelques plans mais proposent des solutions applicables à différentes configurations. Certaines actions sont communes à plusieurs phases de correction et s'adaptent en fonction de l'erreur et des éléments impactés. Ces actions sont génériques et seules les images indiquant l'impact de l'action sont modifiées à chaque question. Un des choix proposés est de ne rien modifier et de passer directement à la question suivante.

TABLE 3.2 – Actions possibles de corrections de l'utilisateur lors des trois phases de QCM.

	Créer lien topo.	Supprimer mur	Modifier. info. sém.	Créer mur	Créer porte	Supprimer espace
Forme Extérieure	✓	x	✓	✓	x	x
Éléments intérieurs	✓	✓	x	✓	✓	x
Espaces	x	✓	x	x	x	✓

Lors de la phase de reconstruction de la forme extérieure, les choix proposés à l'utilisateur après l'identification de deux murs pouvant être en relation sont les suivants :

1. Créer un lien topologique entre les deux murs. Cela permet de corriger si nécessaire la géométrie des deux murs. Une question supplémentaire est parfois posée pour spécifier la géométrie du lien topologique et déterminer où s'effectue la liaison.
2. Modifier l'information sémantique des murs en indiquant si un des murs est un mur intérieur et non extérieur.
3. Créer un mur manquant entre les deux murs. Dans ce cas là, une nouvelle question est posée en proposant plusieurs choix d'épaisseur et de positionnement pour le nouveau mur.

Lors de la phase de reconstruction intérieure, les choix sont similaires sauf que l'utilisateur peut directement supprimer un des murs intérieurs et créer des portes intérieures. Dans ce cas, la création des murs et des portes est guidée et l'utilisateur doit seulement valider ou non la présence de l'élément. Des algorithmes spécifiques ont été développés pour proposer les choix et définir les positions les plus probables des éléments.

Par exemple, une porte est validée dans la représentation graphique considérée par un arc de cercle. La fonction de Hough permettant de détecter cet arc donne son centre et son rayon. Le centre de l'arc détecté est comparé avec la position probable de la porte. Suivant la distance entre ces deux points, la porte ne peut être validée que par une intervention humaine car il se peut que l'arc détecté ne corresponde pas à la porte recherchée.

Pendant la recherche des espaces moins d'actions sont possibles car les éléments du bâtiment sont considérés comme figés. C'est pourquoi, l'utilisateur peut seulement supprimer un espace ou supprimer un mur intérieur. Les questions sur les espaces sont posées dans le cas où l'espace n'a pas d'ouvrant ou lorsque son aire est inférieure à une aire minimum prédéfinie.

La figure 3.12 présente un exemple d'interventions utilisateur pour une erreur identifiée. Pour chaque question posée, trois images permettent d'aider l'utilisateur à prendre une décision. Celle de gauche représente l'image originale du plan. Celle du milieu montre l'état d'avancement de la reconnaissance en mettant en valeur les éléments impliqués dans la correction. Enfin, l'image de droite présente les divers choix proposés à l'utilisateur. Dans l'exemple ci-dessous, la question porte sur la correction de la forme extérieure où deux murs extérieurs n'ont qu'une seule connexion topologique. C'est pourquoi, l'image du milieu représente seulement les murs extérieurs.

Les choix proposés sont les suivants :

1. Les deux murs ne sont pas en lien, aucune modification n'est proposée.
2. Le mur hachuré est en réalité un mur intérieur et ne fait pas partie de la forme extérieure. Le mur hachuré est supprimé de la forme extérieure.
3. Le mur rempli de pixels noirs est en réalité un mur intérieur et ne fait pas partie de la forme extérieure. Le mur noir est supprimé de la forme extérieure.
4. Les deux murs sont en relation topologique. Un lien topologique est alors créé et les géométries sont corrigées. La longueur du mur hachuré est modifiée.

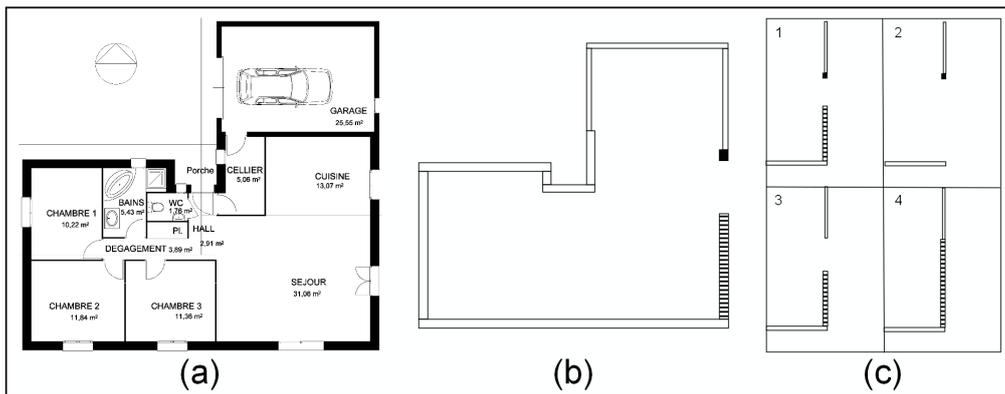


FIGURE 3.12 – Exemple de corrections proposées à l'utilisateur. (a) le plan original, (b) les murs extérieurs identifiés et (c) les propositions faites à l'utilisateur.

L'utilisateur devra choisir dans ce cas la proposition n° 4 afin de relier les deux murs topologiquement et géométriquement. Cette action a plusieurs conséquences : les deux murs sont fusionnés pour n'en former qu'un seul ayant alors deux liens topologiques. De plus, la forme extérieure du bâtiment est fermée ce qui achève les traitements liés à la forme extérieure et déclenche ceux de recherche d'ouvrants extérieurs.

3.4.2.2 Dessiner des éléments

Dans certains cas, la complexité des formes à modéliser, la configuration du plan et les éléments déjà identifiés ne permettent pas de corriger l'erreur par l'intermédiaire des questions et de proposer un ensemble de corrections exactes. C'est pourquoi, il a été décidé de proposer à l'utilisateur une option de dessin afin de reproduire des extraits précis du plan en dessinant via une interface les éléments manquants.

Cependant, ce choix doit être le dernier recours utilisé pour compléter la maquette car il demande plus de temps et de connaissances à l'utilisateur. Il est proposé après la phase de correction par QCM pour limiter le nombre d'actions.

La figure 3.13 est un exemple de plan où il est nécessaire de réaliser du dessin complémentaire. Cette image a été réalisée à la fin de la reconstruction de la forme extérieure. Les murs extérieurs sont représentés en rouge. On voit que les deux murs (A et B) n'ont qu'un seul lien topologique et qu'ils ne peuvent pas être mis en relation grâce aux questions car le processus ne peut pas trouver automatiquement l'emplacement du mur manquant vu qu'il faut également corriger les longueurs des murs A et B.

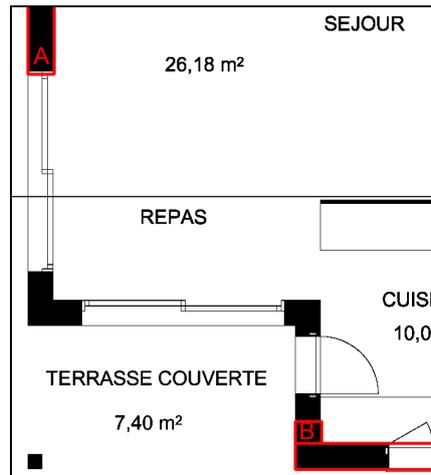


FIGURE 3.13 – Exemple de configuration nécessitant un dessin complémentaire de murs extérieurs pour créer la continuité entre les murs A et B. La position du mur extérieur horizontal manquant ne peut pas être définie automatiquement.

Cette situation se produit car le mur horizontal n'a pas été identifié en raison de la présence d'un ouvrant occupant quasiment tout le mur. Dans ce cas, il suffit pour l'utilisateur de redessiner seulement le mur manquant horizontal et le système relance automatiquement la reconstruction de la forme extérieure en posant si nécessaire de nouvelles questions. Cependant, si l'utilisateur choisit de dessiner l'ensemble des portions de murs manquantes, cela n'entraînera pas d'erreur mais un temps supplémentaire d'action utilisateur.

L'utilisateur est amené à redessiner des éléments manquants après la phase de reconstruction de la forme extérieure du bâtiment et à la fin de la reconstruction intérieure. Les éléments pouvant être dessinés sont les suivants :

- Murs extérieurs durant la phase de reconstruction de la forme extérieure.
- Murs intérieurs durant la phase de reconstruction intérieure.
- Portes intérieures durant la phase de reconstruction intérieure.

Afin de permettre à l'utilisateur de dessiner les éléments manquants, une Interface Homme Machine (IHM) a été développée. L'image originale du plan, sur laquelle sont représentés les éléments déjà identifiés, est affichée dans l'interface. L'utilisateur dessine alors à l'aide d'une souris les éléments manquants qui restent sur le plan et peut supprimer les éléments qu'il a déjà dessinés si besoin. Les coordonnées de tous les objets sont enregistrées afin d'être par la suite automatiquement intégrées parmi les objets existants.

La figure 4.26 est une capture d'écran de l'IHM pour l'exemple présenté en figure 3.13. Le rectangle rouge foncé correspond au mur dessiné par l'utilisateur. Cette IHM, très simple d'utilisation, a également été reprise pour la reconstruction des éléments intérieurs en ajoutant la possibilité de dessiner des murs ou des portes intérieures au lieu des éléments extérieurs. Une option de zoom permet de réaliser des dessins avec une meilleure précision, le déplacement et le dessin se font grâce à la souris.

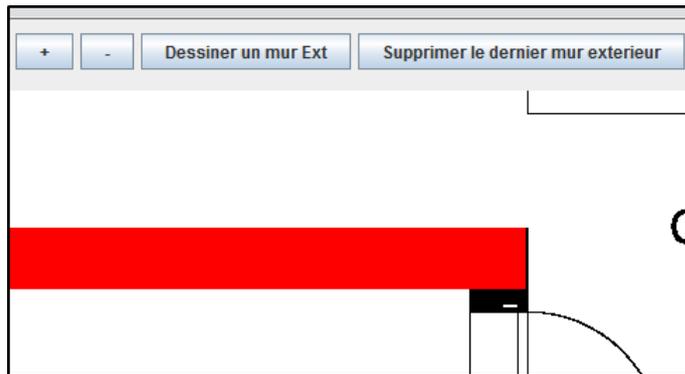


FIGURE 3.14 – Capture d’écran de l’IHM développée pour dessiner des éléments manquants.

3.5 Résultats de l’évaluation de performance

Une évaluation similaire à celle réalisée pour les traitements en automatique a été menée en utilisant la même base d’images de 90 plans de maisons individuelles présentée dans la section 2.6.2. Le processus de reconstruction semi-automatique a été testé sur l’ensemble des plans de la base. Dans cette section, nous présentons tout d’abord deux exemples de reconstruction semi-automatique, puis les résultats obtenus sur la base d’images en appliquant l’évaluation au niveau des pixels, celle axée sur le bâtiment ainsi qu’une analyse des interventions utilisateurs.

3.5.1 Exemples de reconstruction semi-automatique

Le premier exemple met en évidence l’apport de la reconstruction semi-automatique dans le cas d’un mur manquant ainsi que la gestion des murs obliques. L’image originale est présentée en figure 3.15 et les résultats sur la reconstruction de la forme extérieure sont présentés en figure 3.16. La partie de gauche de l’image représente les éléments extérieurs identifiés à la fin du processus automatique et l’image de droite le résultat obtenu après une reconstruction semi-automatique de la forme extérieure du bâtiment.

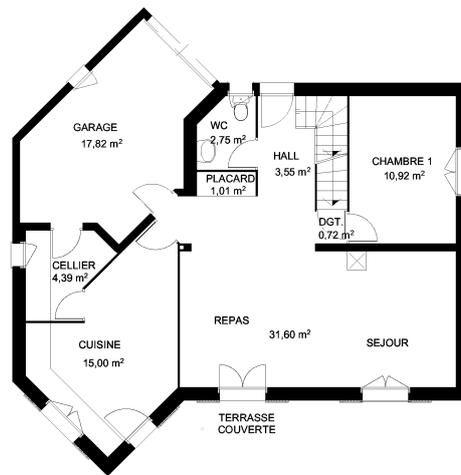


FIGURE 3.15 – Image originale d'un plan issu de la base de 90 plans de maisons individuelles

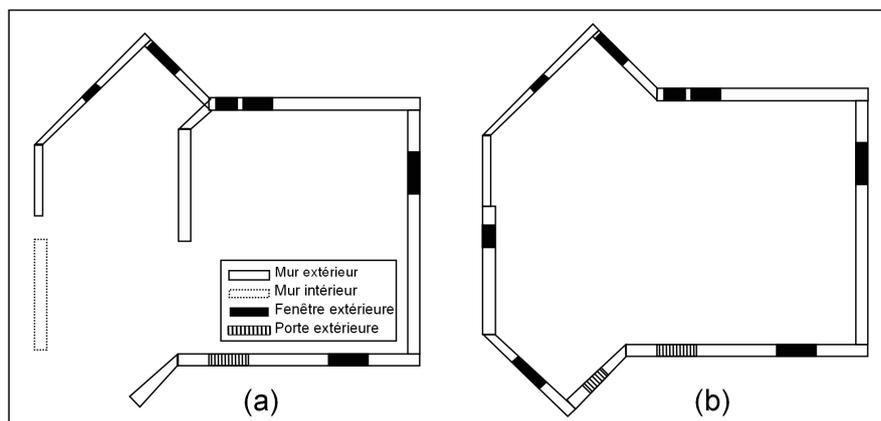


FIGURE 3.16 – Résultats du processus de reconstruction semi-automatique des éléments extérieurs du bâtiment pour le plan de la figure 3.15. (a) le résultat du processus automatique, (b) le résultat issu du processus semi-automatique.

Lors du processus semi-automatique, 7 interventions humaines ont été nécessaires par QCM pour corriger la maquette numérique. Dans cet exemple, la partie de droite du bâtiment a été parfaitement reconstruite lors du processus automatique. Cependant, dans la partie gauche du bâtiment, la forme géométrique est plus complexe avec la présence notamment de deux murs de même direction mais d'épaisseurs différentes, des interventions humaines ont été requises pour obtenir une forme extérieure complète.

Lors du processus automatique des confusions sémantiques entre murs extérieurs et intérieurs ont été commises. Grâce aux corrections, ces erreurs ont été corrigées et un mur oblique manquant a pu être recréé. Ces différentes interventions ont permis d'obtenir une forme extérieure fermée topologiquement et géométriquement. De plus, cela a automatiquement entraîné l'identification de tous les ouvrants extérieurs.

Le deuxième exemple présenté ici est un plan pour lequel un dessin complémentaire de l'utilisateur est nécessaire. En effet, à l'issue du processus automatique, deux murs

dans le même prolongement et d'épaisseurs différentes sont manquants en raison de la présence d'ouvrants qui occupent une trop grande proportion de murs pour en permettre leurs validations.

L'image originale du plan est présentée en figure 3.17 et les résultats sur la reconstruction de la forme extérieure sont présentés en figure 3.18. La partie de gauche de l'image représente les éléments extérieurs identifiés à la fin du processus automatique et l'image de droite le résultat obtenu après une reconstruction semi-automatique de la forme extérieure du bâtiment. 8 questions ont été posées à l'utilisateur et 2 murs ont été dessinés.

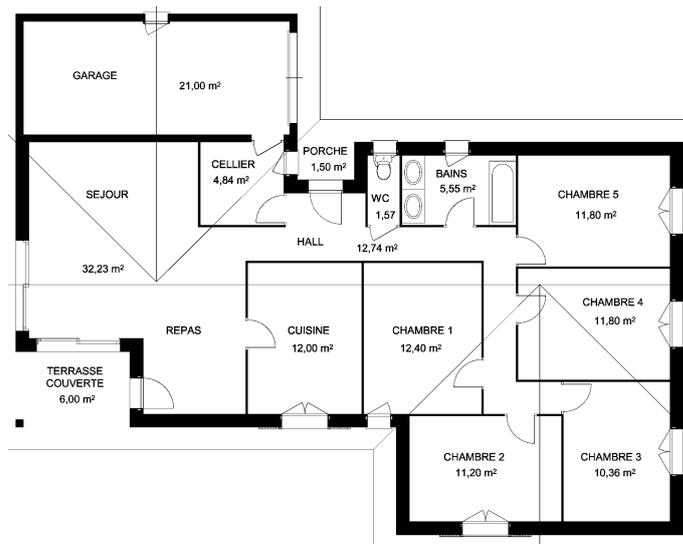


FIGURE 3.17 – Image originale d'un plan issu de la base de 90 plans de maisons individuelles

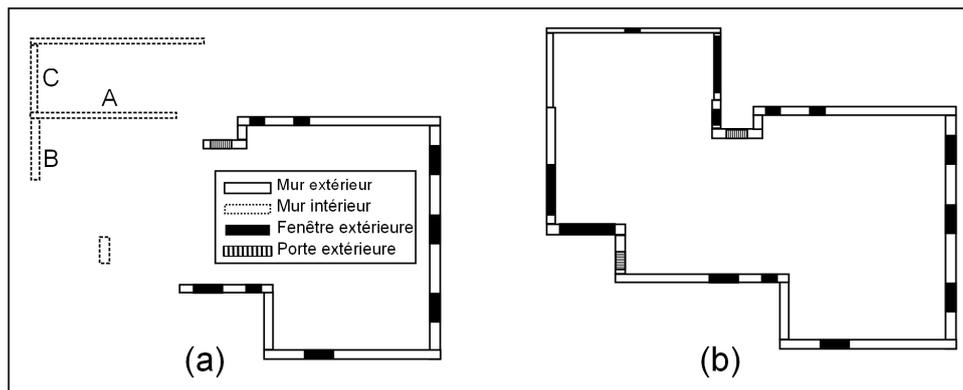


FIGURE 3.18 – Résultats du processus de conversion semi-automatique pour le plan de la figure 3.17. (a) le résultat du processus automatique, (b) le résultat issu du processus semi-automatique.

Dans cet exemple, on remarque lors du processus automatique qu'une mauvaise intersection a été réalisée entre murs intérieurs dont deux devraient être classés en tant que murs extérieurs (murs B et C dans l'image 3.18). Lors du processus semi-automatique, l'utilisateur a indiqué que le mur horizontal n'était pas extérieur (mur A) et cela a permis

de valider le lien topologique entre les murs verticaux afin de compléter la forme extérieure du bâtiment.

De plus, l'utilisateur a dû redessiner manuellement les deux murs verticaux d'épaisseurs différentes au milieu en haut. Ce dessin a été obligatoire car deux murs étaient manquants pour compléter la forme extérieure et le système ne peut pas proposer automatiquement ce choix, il est seulement capable de créer un seul mur manquant entre deux murs comme pour l'exemple précédent.

Les deux exemples présentés sont focalisés sur la reconstruction de la forme extérieure et l'identification des ouvrants associés. Dans les deux cas, les corrections appliquées par l'utilisateur permettent de corriger les erreurs sémantiques entre murs intérieurs et extérieurs grâce à un ensemble de questions ciblées. De plus, la forme extérieure du bâtiment est complète et les ouvrants associés peuvent alors être identifiés correctement.

3.5.2 Évaluation au niveau des pixels

Afin d'évaluer nos résultats et de comparer les performances par rapport à celles obtenues en reconnaissance automatique, nous avons appliqué les mêmes évaluations que dans le chapitre 2. La première est basée sur une évaluation au niveau du pixel. Grâce à la base de vérité terrain réalisée précédemment, l'image issue du processus semi-automatique et l'image vérité terrain sont comparées pixel à pixel. Cette comparaison permet de générer automatiquement des matrices de confusion pour évaluer les erreurs commises.

Deux matrices de confusion ont été calculées afin de synthétiser les erreurs commises. La première matrice ne prend pas en compte les distinctions sémantiques entre les éléments (intérieur/extérieur, porte/fenêtre). Comme le montre le tableau 3.3, 94.06% de murs sont bien identifiés et 87.62% d'ouvrants. Les résultats se sont considérablement améliorés par rapport à la reconnaissance automatique où 84.40% de murs avaient été bien reconnus et 60.34% d'ouvrants.

TABLE 3.3 – Matrice de confusion calculée à partir de l'évaluation des 90 images de la base de plan. Dans cette matrice, la sémantique n'est pas évaluée.

		Estimation		
		Sol	Murs	Ouvrants
Vérité Terrain	Sol	99.72%	0.21%	0.07%
	Murs	5.08%	94.06%	0.86%
	Ouvrants	6.95%	5.43%	87.62%

La matrice de confusion suivante 3.4 prend en compte les distinctions sémantiques et permet une analyse plus détaillée : 77.98% de portes intérieures sont bien reconnues et 15.64%. Le processus semi-automatique a permis de fortement diminuer le nombre de portes intérieures manquantes qui était de 39.25% en automatique. Globalement, les éléments intérieurs sont ceux les moins bien identifiés car 11.34% de murs intérieurs n'ont également pas été reconnus dans les images.

Comparés aux résultats obtenus lors de la reconnaissance automatique, on observe que les erreurs sémantiques entre murs extérieurs et intérieurs ont fortement diminué et sont

comprises entre 0.45% et 1.49% contre 10% en automatique. Quelques confusions sont toujours présentes au niveau de la distinction porte/fenêtre avec environ 5% d'éléments mal identifiés.

TABLE 3.4 – Matrice de confusion calculée à partir de l'évaluation des 90 images de la base de plan. Dans cette matrice, la distinction sémantique entre les éléments intérieurs et extérieurs ainsi et la différence entre porte et fenêtre est prise en compte.

		Estimation					
		Sol	Murs Int.	Murs Ext.	Portes Int.	Fen. Ext.	Portes Ext.
Vérité -Terrain	Sol	99.73%	0.09%	0.11%	0.02%	0.04%	0.01%
	Murs Int.	11.34%	86.85%	1.49%	0.32%	0.00%	0.00%
	Murs Ext.	3.50%	0.45%	95.07%	0.00%	0.73%	0.25%
	Portes Int.	15.64%	3.17%	0.20%	77.98%	0.30%	2.71%
	Fen. Ext.	5.74%	0.15%	5.87%	0.00%	82.91%	5.33%
	Portes Ext.	6.74%	0.27%	4.23%	0.00%	5.32%	83.44%

Ces matrices de confusion ont par la suite été utilisées pour calculer l'indicateur du Jaccard Index (JI) présenté dans la section 2.6.4.1. Le tableau 3.5 indique pour chaque critère la valeur du JI. Plus cette valeur est proche de 1 et meilleure est la qualité de l'identification.

TABLE 3.5 – Évaluation semi-automatique sur les 90 images de la base de plan. Les résultats sont exprimés en utilisant le Jaccard Index calculé selon différents critères. La valeur obtenue lors des tests réalisés en automatique est inscrite entre parenthèses.

Critère	JI
1.Évaluation globale	0.84 (0.65)
2.Murs	0.86 (0.76)
2.1.Murs extérieurs	0.88 (0.69)
2.2.Murs intérieurs	0.72 (0.44)
3.Ouvrants	0.79 (0.55)
3.1.Ouvrants extérieurs	0.81 (0.55)
3.2.Ouvrants intérieurs	0.61 (0.43)

Les résultats obtenus grâce à la reconnaissance semi-automatique sont prometteurs. Le JI calculé pour l'ensemble des 90 plans est égal à 0.84 pour l'évaluation globale, 0.86 pour les murs et 0.79 pour les ouvrants. Comparés aux résultats obtenus avec le processus automatique, on observe une amélioration de 0.20 en moyenne. Même si le JI des ouvrants intérieurs est plus bas que les autres avec une valeur de 0.61, l'amélioration est elle aussi égale à 0.20.

La figure 3.19 représente la distribution en fréquence du JI calculé pour les 90 plans selon les critères suivants : évaluation globale, des murs et des ouvrants. Par rapport à la même représentation effectuée pour le processus automatique, deux phénomènes sont à relever.

Tout d'abord, on observe une homogénéisation des courbes de reconnaissance des murs et des ouvrants. De plus, le pic de reconnaissance est plus élevé et plus centré que lors de

l'évaluation en automatique. Sa valeur la plus élevée était obtenue pour la reconnaissance des murs avec une fréquence égale à 30. Ici, plus de la moitié des plans traités ont des valeurs de JI supérieures à 0.80 pour les trois critères.

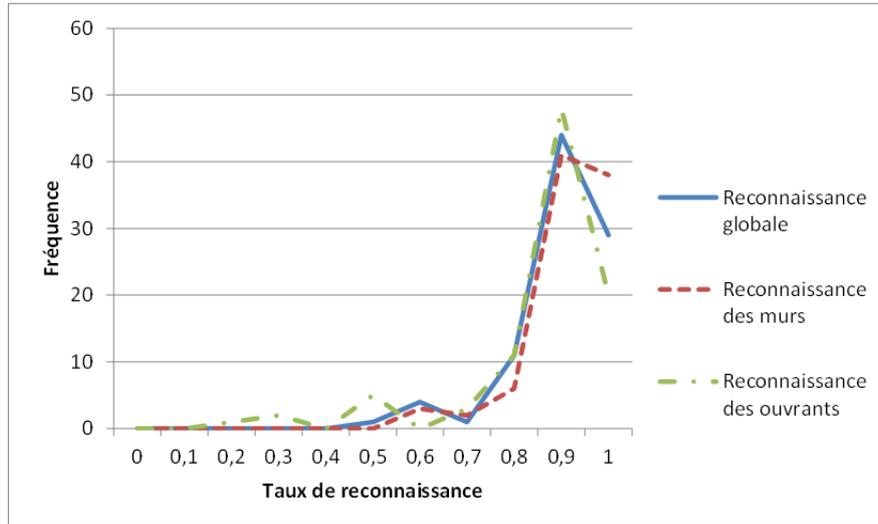


FIGURE 3.19 – Représentation en fréquence des valeurs du Jaccard Index pour la reconnaissance globale, des murs et des ouvrants sur la base d'images des 90 plans.

La figure 3.20 est un graphique représentant les effectifs cumulés décroissants des valeurs de Jaccard Index en reconnaissance globale calculés lors des évaluations automatiques et semi-automatiques. Ce graphique illustre bien les meilleurs résultats obtenus par le processus semi-automatique où 73 plans sur 90 ont un taux de reconnaissance globale supérieur ou égal à 0.8 contre 20 plans en reconnaissance automatique.

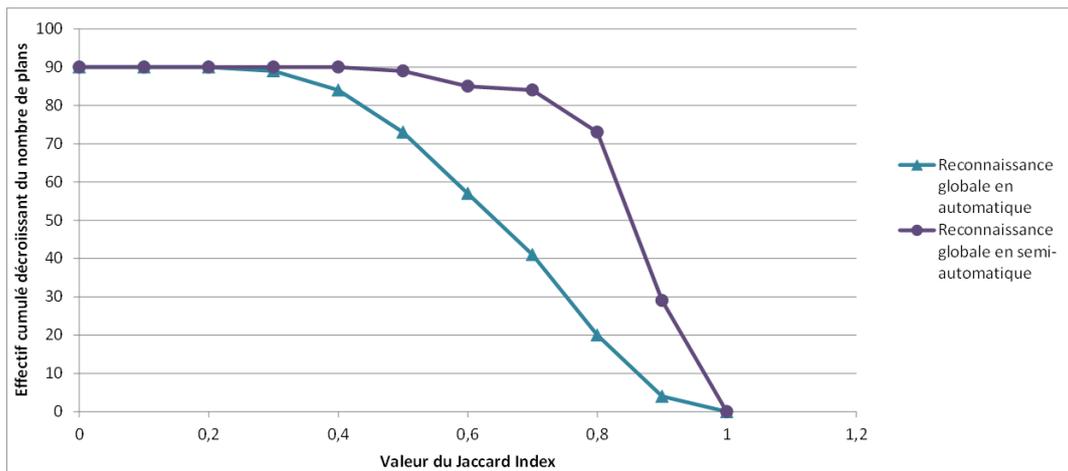


FIGURE 3.20 – Graphique des effectifs cumulés décroissants des valeurs de Jaccard Index en reconnaissance globale des évaluations automatiques et semi-automatiques.

3.5.3 Évaluation du bâtiment

Comme lors de l'évaluation de performance en automatique, une deuxième évaluation plus axée sur la structure du bâtiment a été réalisée. Deux éléments du bâtiment ont été évalués : le nombre d'ouvrants et le nombre de mètres de murs linéaires reconnus.

Le tableau 3.6 récapitule les résultats obtenus lors de l'évaluation des ouvrants sur les 90 plans testés. Pour chaque plan, les ouvrants bien reconnus, manquants et inexistantes sont comptabilisés en faisant les distinctions sémantiques entre intérieur/extérieur et porte/fenêtre.

Cette fois-ci, on note que les meilleurs résultats sont obtenus pour les portes intérieures où 96.18% de portes ont été identifiées contre 56.27% en automatique. Cela est en partie dû au fait que l'utilisateur peut redessiner lors de la phase de reconstruction intérieure des portes manquantes. Cependant, suivant la configuration des plans, certaines portes ne sont pas toujours prises en compte puisque 21 portes intérieures sont manquantes.

TABLE 3.6 – Résultats de l'évaluation de la reconnaissance des ouvrants, ils sont exprimés en nombre d'ouvrants. En horizontal l'estimation et en vertical les données de vérité terrain.

	Manquants	Portes Ext.	Fenêtres Ext.	Portes Int.
Faux	x	10	37	9
Portes Ext.	15 (5.30%)	247 (87.28%)	21 (7.42%)	0 (0.00%)
Fenêtres Ext.	45 (5.58%)	42 (5.21%)	719 (89.21%)	0 (0.00%)
Portes Int.	21 (3.21%)	4 (0.61%)	0 (0.00%)	629 (96.18%)
Ouvrants reconnus : 95% - Manquants : 5%				

Globalement, seulement 5% d'ouvrants n'ont pas été reconnus ce qui correspond à 81 ouvrants soit moins de un ouvrant par plan contre 38% en automatique. On note aussi comme pour la reconstruction automatique que peu d'éléments inexistantes ont été créés : 56 ouvrants soient 0.03% ce qui est un bon résultat.

La deuxième évaluation est axée sur le calcul du nombre de mètres de murs linéaires bien identifiés dans chaque plan. La distinction sémantique entre murs intérieurs et murs extérieurs est prise en compte et les résultats sont présentés dans le tableau 3.7.

Si l'on ne prend pas en compte la distinction sémantique, 99% de mètres de murs linéaires ont été bien identifiés dans les plans contre 87% en automatique. La différence entre murs intérieurs et extérieurs n'est ici pas significative (seulement 1.32% d'écart). Cependant, on note que peu de murs inexistantes ont été créés lors du processus de reconnaissance semi-automatique : 172 mètres ce qui correspond à 0.02% de la totalité des murs identifiés dans les plans. Ce taux a été divisé par 10 par rapport au processus automatique.

TABLE 3.7 – Résultats de l'évaluation sur le nombre de mètres de murs linéaires. Les résultats sont exprimés en mètres. En horizontal l'estimation et en vertical les données de vérité terrain.

	Manquants	Murs Ext.	Murs Int.
Faux	x	86	86
Murs Ext.	49 (1.01%)	4724 (98.74%)	12 (0.25)%
Murs Int.	57 (2.05%)	15 (0.53%)	2693 (97.42%)
Murs reconnus : 99% - Manquants : 1%			

3.5.4 Analyse des interventions utilisateurs

Cette section présente l'analyse réalisée sur les interventions utilisateurs afin d'étudier les actions de l'utilisateur ainsi que les principales conséquences. Lors des tests réalisés sur les 90 plans, la durée de traitement de chaque plan n'excède pas les 10-15 minutes sachant que les tests ont été menés après une phase de prise en main de l'outil.

3.5.4.1 Analyse des actions utilisateurs

Comme expliqué précédemment, les actions utilisateurs consistent à répondre à des questions à choix multiples et à dessiner des éléments complémentaires si nécessaire. La figure 3.21 représente la distribution en fréquence du nombre de questions posées par le système à l'utilisateur. En moyenne, lors de la reconstruction de la forme extérieure 14 questions sont posées, cette valeur est seulement égale à 4 pour les éléments intérieurs.

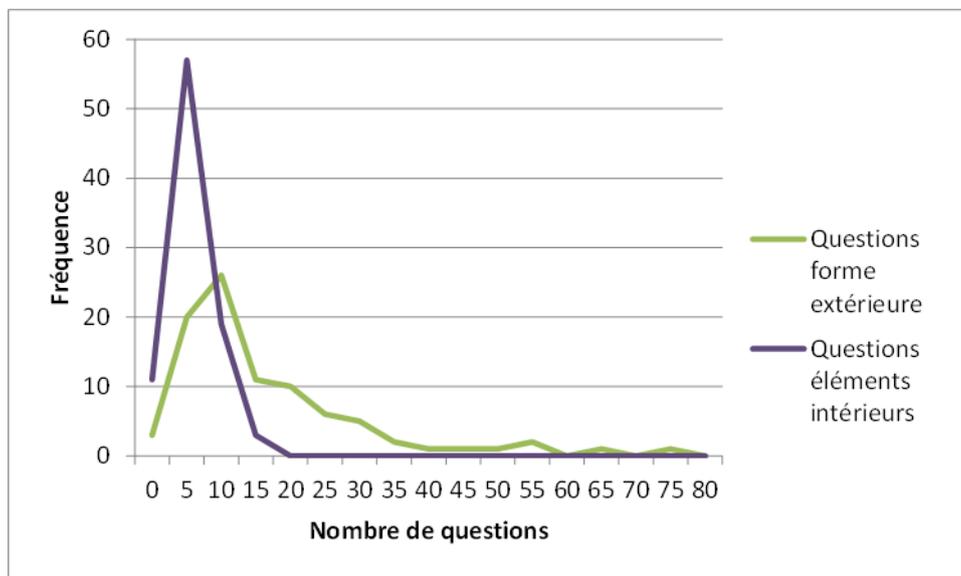


FIGURE 3.21 – Représentation en fréquence du nombre de questions posées à l'utilisateur pour la reconstruction de la forme extérieure et des éléments intérieurs sur la base d'images des 90 plans.

Cependant, on observe sur le graphique lors de la reconstruction de la forme extérieure que pour la majorité des plans (57), le nombre de questions posées varie entre 5 et 10. Quelques plans nécessitent un nombre de questions supérieur à 30 ce qui est élevé. Cela

s'explique par le fait que des questions sont posées tant que toutes les possibilités n'ont pas été testées pour relier les murs extérieurs entre eux.

Ainsi, dans le cas où il est nécessaire de redessiner des murs, le processus va d'abord tester toutes les configurations avant de permettre à l'utilisateur de dessiner les murs manquants. Suivant la configuration du plan et la qualité de l'identification des éléments, plusieurs murs peuvent manquer ce qui augmente fortement le nombre de questions sans action.

De plus, certains plans ont la particularité d'avoir des murs extérieurs ne faisant pas partie de la forme extérieure du bâtiment tels qu'un local proche de la maison principale. Cette configuration entraîne là aussi un nombre important de questions car le système va chercher à obtenir une unique enveloppe externe du bâtiment fermée.

Le graphique suivant 3.22 représente la distribution en fréquence du nombre d'éléments dessinés par l'utilisateur. A l'inverse du graphique précédent, on observe cette fois-ci que la majorité des éléments dessinés sont intérieurs. Pour 53 plans sur 90 il n'a pas été nécessaire de dessiner de murs extérieurs. Cela montre la pertinence de l'approche développée et des choix de correction proposés à l'utilisateur pour la reconstruction de la forme extérieure.

En moyenne 3 portes intérieures et 3 murs intérieurs sont dessinés par plan contre moins d'un mur extérieur par plan. Ce résultat met en évidence la difficulté d'identification des éléments intérieurs et le fait que beaucoup d'éléments ne sont pas initialement reconnus.

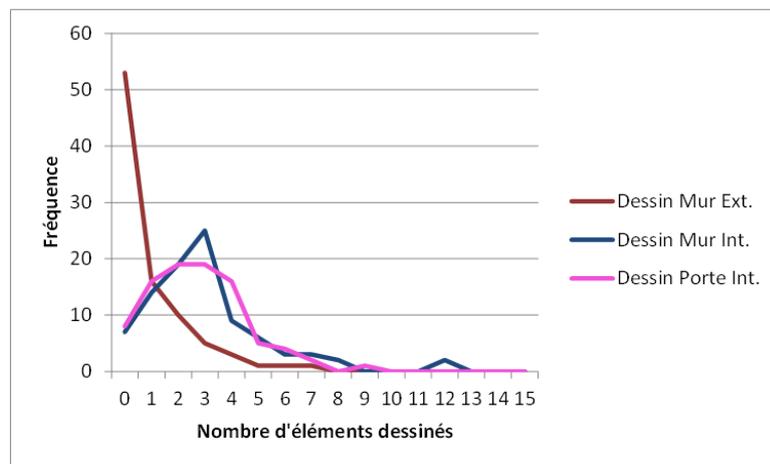


FIGURE 3.22 – Représentation en fréquence du nombre d'éléments dessinés par l'utilisateur : murs extérieurs et intérieurs et portes intérieures sur la base d'images des 90 plans.

Les courbes des éléments intérieurs : murs et ouvrants sont similaires et montrent que pour quasiment tous les plans testés, il a été nécessaire de dessiner des éléments additionnels. Ces dessins complémentaires ont permis l'amélioration des différents taux de reconnaissance notamment au niveau de l'évaluation du bâtiment. Au niveau de l'évaluation par pixel, la précision du dessin influe fortement sur les taux de reconnaissance car un faible décalage entraîne des erreurs importantes à l'échelle des pixels.

La figure 3.23 représente la répartition des actions utilisateurs lors des tests effectués sur les 90 images de plan de la base. Les questions posées et notamment celles concernant la reconstruction de la forme extérieure constituent 73% des actions. Le dessin ne concerne que 27% des actions dont 23% sont dédiées à la reconstruction des éléments intérieurs. Ces résultats sont cohérents avec nos objectifs car les deux tiers des actions sont de répondre à un QCM. Le recours au dessin d'éléments manquants est une action plus ponctuelle.

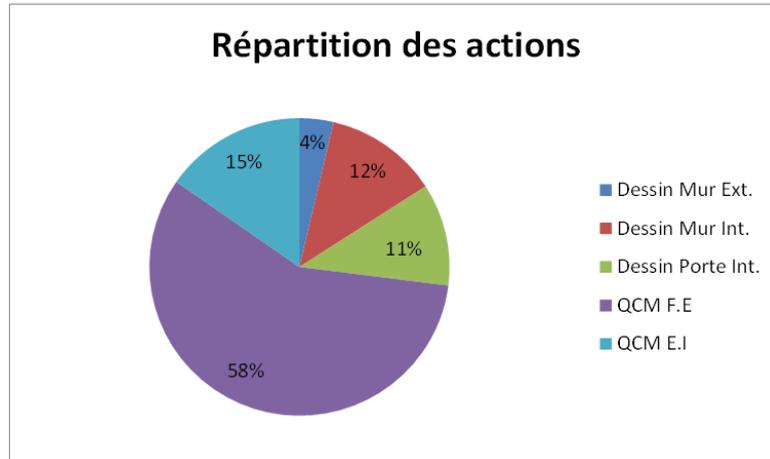


FIGURE 3.23 – Répartition des interventions utilisateurs lors des tests sur la base d'images des 90 plans.

3.5.4.2 Analyse des impacts des actions utilisateurs

Nous avons également cherché à caractériser les conséquences des questions posées et des dessins réalisés sur la reconnaissance. Pour cela, à la suite de chaque action de l'utilisateur, nous avons enregistré les conséquences sur la maquette. La figure 3.24 représente les conséquences possibles.

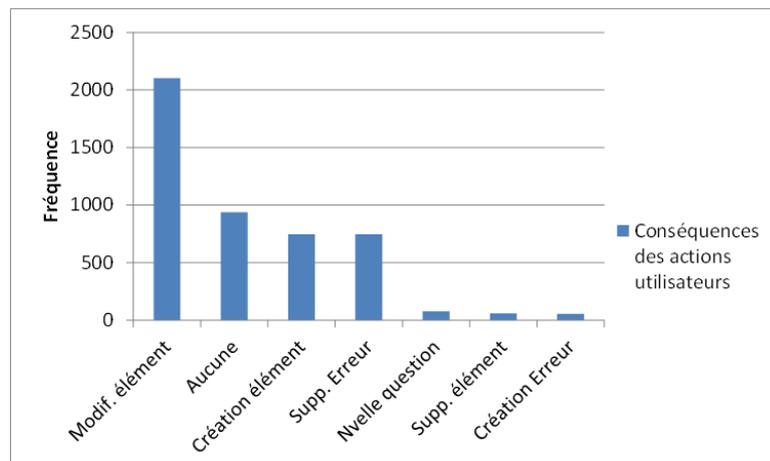


FIGURE 3.24 – Répartition des conséquences suite aux interventions utilisateurs lors des tests sur la base d'images des 90 plans.

Lors des tests réalisés sur les 90 plans, un total de 2222 actions et 4731 conséquences a été comptabilisé. Chaque action entraîne donc en moyenne deux conséquences distinctes. Par exemple, la modification d'un mur peut induire la suppression de plusieurs erreurs.

La conséquence la plus courante est la modification de murs. Ces modifications concernent indifféremment la géométrie, la topologie ou la sémantique. Un nombre non négligeable d'actions n'entraîne aucune conséquence. Il s'agit des questions dont les éléments impliqués ne sont pas en relation topologique et où l'utilisateur choisit de ne rien modifier et de passer à la question suivante.

Beaucoup d'erreurs et quelques éléments sont supprimés au cours des actions utilisateurs. Il est important de noter qu'un petit nombre de questions a pour conséquence une nouvelle action de l'utilisateur. Par exemple, lors de la création d'un mur, une question complémentaire est parfois posée pour préciser la position du mur.

Afin de mieux analyser les conséquences des actions sur les éléments du bâtiment, la figure suivante 3.25 représente le pourcentage d'éléments étant impliqués dans les traitements suivants : création, modification et suppression.

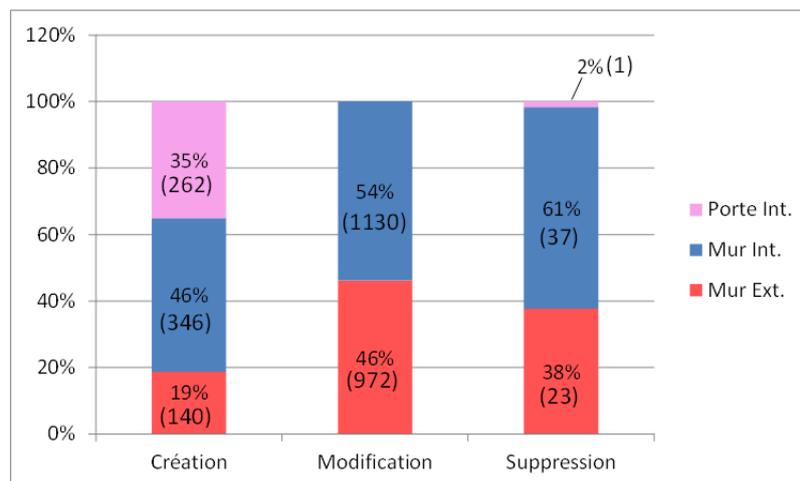


FIGURE 3.25 – Répartition des conséquences sur les murs et ouvrants.

Ainsi, il apparaît que la plupart des éléments impliqués lors des actions utilisateurs concernent les murs intérieurs qui sont principalement créés, modifiés et supprimés. Cela s'explique en partie par le fait que le processus de sélection d'un mur intérieur est plus souple que pour les autres éléments.

Beaucoup de portes intérieures sont également créées, 262 soit une moyenne de 3 par plan. La création d'une porte intérieure entraîne généralement la modification d'un ou plusieurs murs voire la création d'un nouveau mur intérieur. Peu d'éléments extérieurs sont créés en raison du principe de correction qui se focalise en partie sur la reconstruction de la forme extérieure du bâtiment.

De nombreux murs extérieurs sont aussi modifiés, ce qui correspond principalement aux modifications sémantiques pour convertir des murs extérieurs en murs intérieurs ainsi que des modifications géométriques pour mettre en lien deux murs extérieurs afin de fermer la forme extérieure du bâtiment.

3.6 Conclusion - Discussion

La méthodologie de reconnaissance semi-automatique mise en place a été conçue de façon à solliciter ponctuellement l'utilisateur au cours du processus de conversion de l'image de plan papier en une maquette numérique 3D. Une analyse des erreurs les plus courantes a été préalablement effectuée pour les identifier et les classer et pour prioriser les interventions utilisateurs afin qu'elles soient les plus pertinentes possibles.

Les interventions utilisateurs sont de deux types : réponse à des questions à choix multiples et dessin complémentaire d'un élément. Elles ne sont pas automatiques et dépendent des erreurs relevées lors des traitements. L'utilisateur peut intervenir à différentes étapes de la reconversion : après la reconstruction de la forme extérieure du bâtiment, de la reconstruction intérieure et de la recherche des espaces.

Des tests semi-automatique ont ensuite été effectués sur l'ensemble des images de la base de plans utilisée lors des tests en reconnaissance automatique afin de comparer les résultats obtenus. Le temps d'exécution pour chaque plan est de l'ordre de la dizaine de minutes et dépend fortement du nombre d'erreurs initiales mais il reste cohérent avec nos objectifs.

Les résultats sont prometteurs même si les éléments intérieurs sont un peu moins bien reconnus que ceux extérieurs. Au niveau des interventions utilisateur, on observe que les questions à choix multiples sont en majorité posées lors de la reconstruction de la forme extérieure alors que le dessin complémentaire est plus utilisé pour la reconstruction intérieure.

En analysant les résultats, on peut noter plusieurs améliorations possibles. Tout d'abord, 20% des questions à choix multiples n'entraînent aucune conséquence. C'est à dire que les éléments impliqués dans la question n'ont aucun lien entre eux. Il serait donc intéressant d'optimiser plus encore le processus de questions.

Dans certains cas, le système peut poser de 10 à 20 questions à la suite qui n'ont aucune conséquence sur les éléments impliqués. De plus, un grand nombre de questions sont posées lorsque deux murs sont en lien par l'intermédiaire de plusieurs murs manquants. Dans ce cas, le processus développé va tester toutes les possibilités de liens avec ces deux murs alors qu'il faudrait seulement dessiner les murs manquants. Le choix de privilégier dans un premier temps le QCM est donc perfectible.

Une idée consisterait à analyser les éléments sans réponse afin de proposer de nouveaux choix de correction. Un apprentissage des réponses par un retour d'expérience permettrait d'améliorer le processus. De plus, l'utilisateur pourrait avoir la possibilité de directement passer à la phase de dessin complémentaire si il le souhaite. En effet, jusqu'à présent, le dessin complémentaire n'est proposé qu'à la fin du processus de questions à choix multiples.

Il serait intéressant pour l'utilisateur et plus efficace de pouvoir basculer d'un mode à l'autre si nécessaire. Cette solution pourrait à la fois permettre de diminuer le nombre de questions et d'optimiser le temps passé par l'utilisateur à corriger la maquette. En contrepartie, cela donnerait plus de liberté à l'utilisateur et il faudrait qu'il prenne plus de décisions à l'inverse du processus actuel.

Il serait intéressant de réaliser une série de tests sur un ensemble varié de personnes afin de tester la prise en main et la pertinence des questions posées. En effet, les futurs utilisateurs d'un tel outil ne seront pas forcément des experts en bâtiment ou en développement de logiciel informatique et c'est pourquoi le processus semi-automatique a été développé pour être intuitif à prendre en main et à utiliser.

Les tests lors du processus automatique et semi-automatique ont été réalisés sur une base d'images de plans de même charte graphique. Les murs sont remplis de pixels noirs et les portes intérieures sont représentées par des arcs de cercle. Il serait intéressant par la suite d'évaluer la robustesse de la méthodologie mise en place sur des plans d'origine et de charte graphique différentes.

De plus, les plans testés sont tous des plans de maisons individuelles et il faudrait pouvoir tester l'outil sur des bâtiments de taille plus importante pour évaluer la méthodologie lorsque le nombre d'éléments du bâtiment est plus élevé.

Le chapitre suivant traite de la généralisation de la méthodologie à des plans d'autres origines que ceux utilisés dans les tests initiaux et de qualité variable. En complément, des tests utilisateurs ont été réalisés pour analyser le processus semi-automatique sur des profils d'utilisation variés.

Chapitre 4

Généralisation de l’outil

Sommaire

4.1	Objectifs et problématique	108
4.2	Généralisation des plans	109
4.2.1	Adaptation à diverses représentations	109
4.2.1.1	Méthodologie générale	109
4.2.1.2	Cas de murs représentés par des zones homogènes blanches	110
4.2.1.3	Cas de murs représentés par des hachures	112
4.2.2	Passage à l’échelle	114
4.2.2.1	Problématiques	114
4.2.2.2	Informé l’utilisateur lors de la reconstruction de la forme extérieure	115
4.2.2.3	Estimer le nombre d’actions restantes	117
4.2.3	Extension à la construction multi-niveaux	119
4.2.4	Applications et performances sur d’autres représentations	121
4.2.4.1	Plans d’appartements anciens	121
4.2.4.2	Plans de bâtiment de plus grande dimension	123
4.2.4.3	Estimation du temps d’exécution du processus	127
4.3	Diversité des utilisateurs	129
4.3.1	Déroulement de la phase de tests	129
4.3.2	Résultats des tests utilisateurs	131
4.3.2.1	Définition de l’échantillon	131
4.3.2.2	Analyse des résultats	131
4.4	Conclusion - Discussion	136
4.4.1	Validation de la robustesse et généralisation	136
4.4.2	Validation du procédé de reconstruction assistée	137

4.1 Objectifs et problématique

Les plans utilisés jusqu'à présent pour évaluer notre méthodologie ont tous été conçus à l'aide du même outil, en suivant la même charte graphique. En particulier, les symboles des portes sont identiques (arcs de cercle) et les textures des murs sont uniques (zones homogènes remplies de pixels noirs).

De nombreuses similitudes sont présentes entre les différents plans concernant la forme extérieure des bâtiments ou encore la reconstruction intérieure. Les images de ces plans ont la particularité d'être de bonne qualité. Les appartements et/ou maisons représentés sont des logements individuels dont l'aire globale est inférieure à 250m². Tous les plans correspondent à des rez-de-chaussée et aucun plan d'étage supérieur n'est fourni dans cette base de données bien que des escaliers soient parfois représentés sur le plan.

Cette base d'images a été utilisée dans les chapitres précédents pour valider une méthodologie de génération de maquette numérique 3D et pour réaliser différents tests : tout d'abord avec une version automatique de l'outil puis en utilisant la solution semi-automatique proposée.

Cependant, l'hypothèse posée dans le chapitre 2 concernant la représentation des murs est assez réductrice car tous les plans ne sont pas conçus suivant les mêmes règles de représentation. En particulier, dans le cadre de projet de rénovation, la qualité du plan original n'est pas toujours bonne et la charte graphique peut varier. De plus, différents types d'acteurs peuvent être amenés à utiliser cet outil avec des compétences techniques variées. C'est pourquoi dans ce chapitre nous présentons le travail réalisé pour évaluer la robustesse des méthodologies développées suivant deux axes :

1. La généralisation des plans utilisés en données d'entrée de l'outil.
2. La pertinence de l'approche sur des utilisateurs aux profils variés.

Dans un premier temps, le processus a été amélioré en développant une méthodologie particulière pour traiter des plans utilisant des représentations différentes. Pour cela, des plans de source et de qualité différentes ont été collectés et testés. Cette méthodologie a la particularité de ne pas modifier les développements précédents mais d'être plutôt une extension du procédé existant.

Dans un deuxième temps, des tests ont été effectués sur un ensemble d'utilisateurs à profils variés afin de montrer la flexibilité de l'outil, sa rapidité de prise en main et d'utilisation ainsi que la pertinence du processus semi-automatique développé. Le résultat de cette expérience a permis de proposer des pistes d'amélioration pour une meilleure utilisation et d'imaginer de futures méthodes afin de mieux guider l'utilisateur dans ses choix.

4.2 Généralisation des plans

Dans cette section, la méthodologie mise en place pour traiter des plans de différentes chartes graphiques est présentée. De plus, la problématique du passage à l'échelle (bâtiments de grande taille et de plusieurs étages) est abordée. Des résultats sont présentés sur plusieurs plans caractéristiques dont un bâtiment composé de deux étages.

Comme évoqué précédemment, les plans ne sont pas tous dessinés en suivant la même charte graphique. Une analyse de plans de sources différentes tels que des plans de bâtiments du CEA de Saclay ou encore des plans récupérés via des agences immobilières a donc été réalisée afin d'identifier les principaux verrous empêchant actuellement le traitement de tous les types de plans. Trois axes de recherche se sont dégagés de cette étude afin d'évaluer la robustesse de l'outil actuel :

1. Traiter des plans présentant une diversité de représentation des murs et des ouvrants.
2. Gérer des bâtiments de grande taille.
3. Avoir la possibilité de créer une maquette numérique d'un bâtiment composé de plusieurs étages.

Ces trois axes ont fait l'objet de développements complémentaires afin d'étendre le procédé actuel sans en modifier le processus général. Cette condition est primordiale afin de ne pas modifier les résultats obtenus lors des tests précédents. Les sous-sections présentent pour chaque axe, les extensions mises en place.

4.2.1 Adaptation à diverses représentations

4.2.1.1 Méthodologie générale

Le premier axe de généralisation concernant les plans est celui lié à la diversité de représentation des éléments dessinés sur le plan. En effet, comme nous l'avons déjà évoqué, les éléments dans un plan peuvent être représentés de différentes façons. L'élément plus particulièrement étudié dans cette partie est le mur qui peut être texturé suivant le type de plans de la manière suivante : une zone homogène de pixels noirs, blancs ou de hachures de couleur. Le mur est également le premier élément reconnu dans le plan qui permet par la suite l'identification et la reconstruction des autres éléments.

Ces trois représentations différentes ont été sélectionnées car elles illustrent la variété de représentations pour un même élément. La figure 4.1 donne pour chaque type de représentation un exemple d'un mur avec un ouvrant associé. La discontinuité entre le mur et l'ouvrant est bien visible même si pour l'image du milieu l'ouvrant n'est défini que par deux traits horizontaux dans un mur vertical.

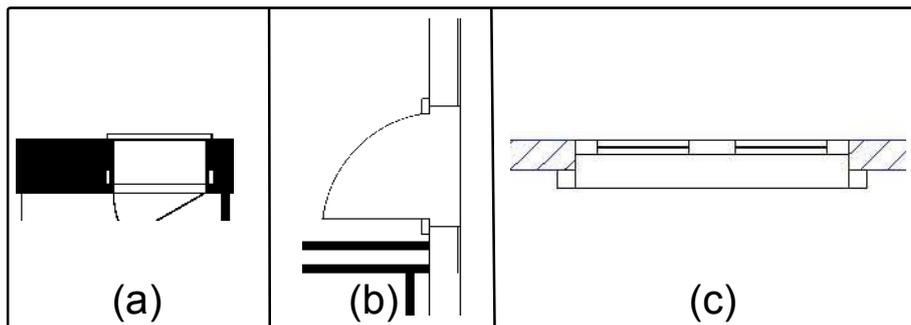


FIGURE 4.1 – Représentations des trois types de texture de murs prises en compte. (a) région homogène noire, (b) région homogène blanche, (c) région homogène hachurée.

Dans la méthodologie développée, la reconnaissance des murs, par l'identification de murs candidats dans l'image, est indépendante du reste des traitements. Cette fonction est la seule qui soit spécifique au type de représentation utilisée afin de valider l'existence ou non des murs candidats.

C'est pourquoi, la méthode retenue consiste à créer une étape intermédiaire lors de l'identification des murs candidats afin de modifier l'image en entrée du processus. Ces traitements préliminaires permettent de créer une image répondant aux caractéristiques requises, c'est à dire que les murs sont représentés par un ensemble homogène de pixels noirs.

Cette image est ensuite utile pour réaliser l'ensemble des tests de validation des murs extérieurs ou intérieurs mais ne peut être utilisée pour déterminer avec précision la géométrie des éléments du bâtiment car les traitements peuvent transformer leur épaisseur. Il est cependant suffisant de ne modifier que cette étape de prétraitement pour homogénéiser la représentation des murs et uniformiser la recherche des symboles.

L'avantage de cette méthode est sa capacité d'être étendue dans le futur. Si un plan a une autre charte graphique que les trois présentées en figure 4.1, il suffit alors de rajouter un nouveau cas dans la fonction de création de l'image de validation. Au moment de l'exécution du programme, un paramètre est ajouté en entrée par l'utilisateur afin d'indiquer le type de représentation du plan. Il est également possible de mettre en place des méthodes pour reconnaître automatiquement la texture utilisée pour représenter les murs.

4.2.1.2 Cas de murs représentés par des zones homogènes blanches

Dans le cas où les murs sont représentés par des zones homogènes de pixels blancs, l'approche retenue consiste à rechercher dans l'image des régions potentielles de murs afin de les représenter par des régions de pixels noirs. Cette nouvelle image est par la suite utilisée pour valider ou non les murs candidats extraits de l'image originale.

Grâce à des méthodes existantes de traitement d'image, une recherche de contours dans l'image est réalisée afin d'identifier ceux pouvant être des murs [119]. Tous les contours dans l'image sont extraits, ce qui entraîne des redondances et des fausses détections de contours ne correspondant pas à des murs. Chaque contour est défini par un ensemble de points formant un polygone fermé.

La figure 4.2 représente l'ensemble des contours identifiés sur un extrait de plan dont

les murs sont représentés par des rectangles noirs remplis de pixels blancs. L'image utilisée est celle contenant seulement les éléments graphiques dont le texte a été préalablement supprimé. On note la multitude de contours et la nécessité de trouver une méthode de tri la plus efficace possible.

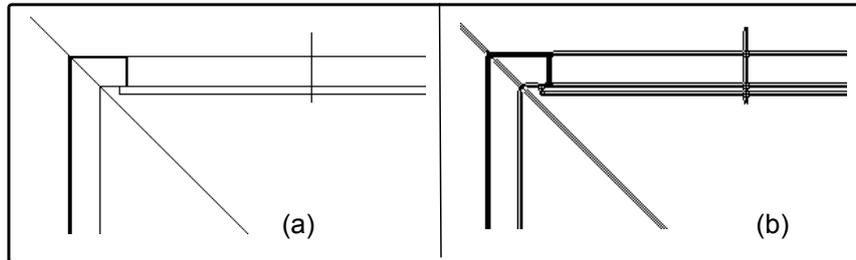


FIGURE 4.2 – Contours extraits d'une image de plan. (a) l'image originale dont le texte a été supprimé, (b) l'image contenant tous les contours.

Afin de ne sélectionner que les contours pouvant représenter des murs et supprimer les autres, le critère suivant a été retenu. L'aire formée par le polygone de chaque contour est calculée et si sa valeur est supérieure à une certaine valeur prédéfinie alors le contour est supprimé. Une fois cette sélection effectuée, le polygone de chaque contour restant est rempli de pixels noirs. Cette méthode permet d'obtenir une image où les murs sont représentés par des zones homogènes de pixels noirs. Cependant, suivant la configuration du plan, certains contours de pièces sont considérés comme des contours de murs et certains murs ne sont pas identifiés.

La figure 4.3 représente l'image de validation obtenue à partir des contours représentés en figure 4.2. On note que tous les murs sont bien représentés par des ensembles de pixels noirs. Cependant, des petits artefacts sont présents notamment sur la partie gauche de l'image avec un trait oblique qui est conservé. Cette image n'étant utilisée que pour des validations de murs et non pour la recherche initiale, cela n'entraînera pas d'erreurs sur l'identification des murs. Cependant, dans certains cas, cette image de validation peut entraîner la validation de faux murs dans les endroits complexes tels que des escaliers quand les contours définis par les marches d'escalier sont remplis de pixels noirs.

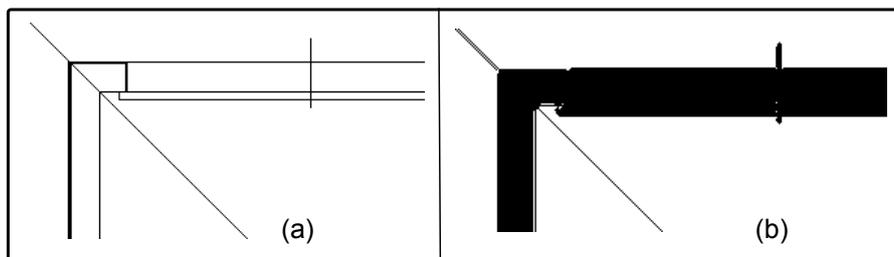


FIGURE 4.3 – Image de validation générée à partir d'une image de plan. (a) l'image originale dont le texte a été supprimé, (b) l'image de validation dans laquelle les murs sont représentés par un ensemble de pixels noirs.

4.2.1.3 Cas de murs représentés par des hachures

Dans d'autres plans, les murs ont la particularité d'avoir pour texture un ensemble de hachures. Des travaux ont porté sur l'extraction de hachures dans des représentations graphiques de cartes ou de plans architecturaux. Le processus consiste alors à supprimer de l'image les hachures grâce à des méthodes qui sont principalement basées sur des transformées de Hough [120].

Dans la méthode de l'état de l'art et dans le cas où les hachures sont toutes dessinées régulièrement et lorsque la qualité de l'image originale est optimale, les hachures sont identifiables de la façon suivante. Une méthode de vectorisation sur l'image telle qu'une transformée de Hough permet d'extraire l'ensemble des segments de l'image. Afin d'identifier les hachures, deux graphiques sont représentés pour analyser les segments extraits. Dans le premier, le couple (θ, ρ) où θ est l'angle orienté du segment et ρ est la distance du segment au centre est reporté. Dans le deuxième, le couple (θ, L) où L est la longueur du segment est représenté pour chaque segment.

Les deux graphiques 4.4 et 4.5 suivants représentent respectivement pour un plan d'un étage de bâtiment comportant des hachures le graphe de (θ, ρ) et celui de (θ, L) pour l'ensemble des segments extraits suite à une transformée de Hough. Les hachures sont identifiables car elles sont représentées par des segments orientés à 45° et de faible longueur. Dans l'exemple ci-dessous, elles sont alors facilement identifiables.

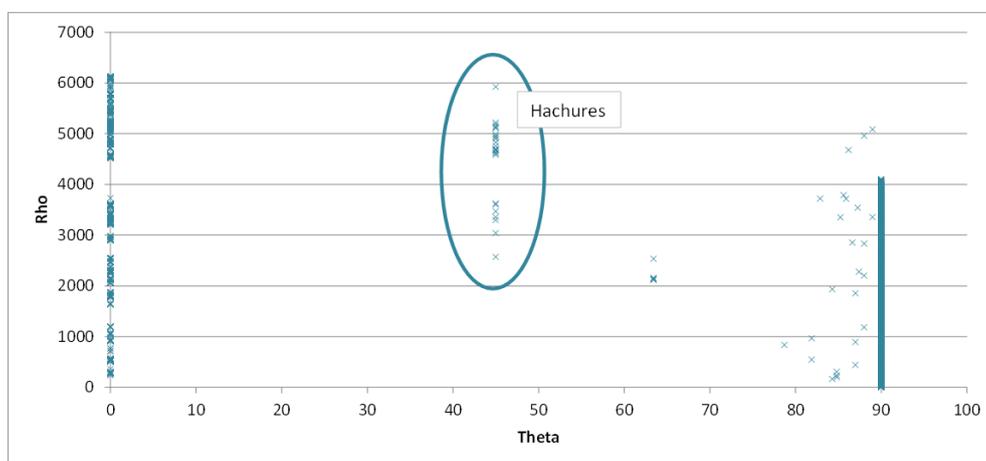


FIGURE 4.4 – Graphique représentant pour chaque segment extrait d'une image de plan par une transformée de Hough le couple (θ, ρ) .

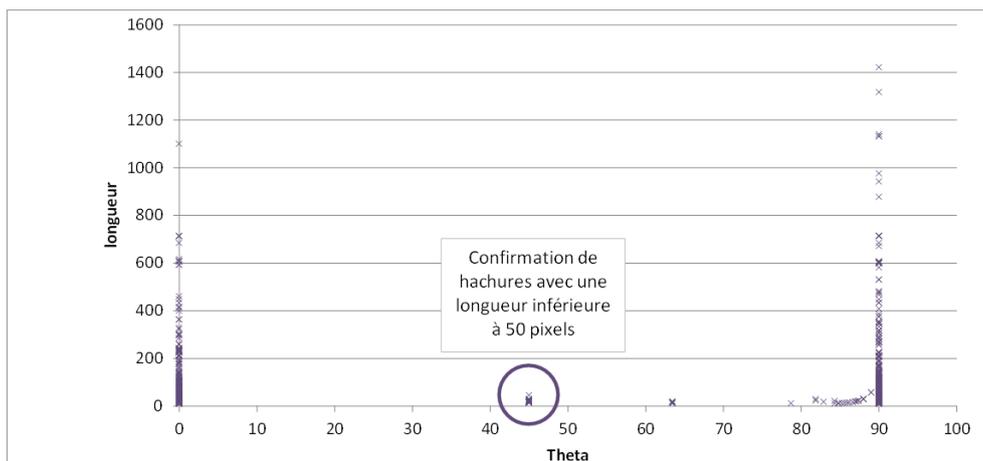


FIGURE 4.5 – Graphique représentant pour chaque segment extrait d’une image de plan par une transformée de Hough le couple (θ, L) où L représente la longueur du segment.

La méthode proposée par Llados et al. est donc suffisamment robuste pour identifier les traits hachurés présents dans une image de plan. Le processus développé utilise donc cette méthodologie pour supprimer les hachures du plan original. Pour créer des ensembles homogènes de pixels noirs, la région créée par deux segments parallèles et proches est texturée en noir.

Lorsque l’on teste cette méthode sur divers plans, si la qualité des hachures n’est pas optimale alors un certain nombre de hachures sont directement supprimées lors de la vectorisation de l’image. La figure 4.6 illustre ce cas en présentant un extrait de plan pour chaque étape du traitement mis en place.

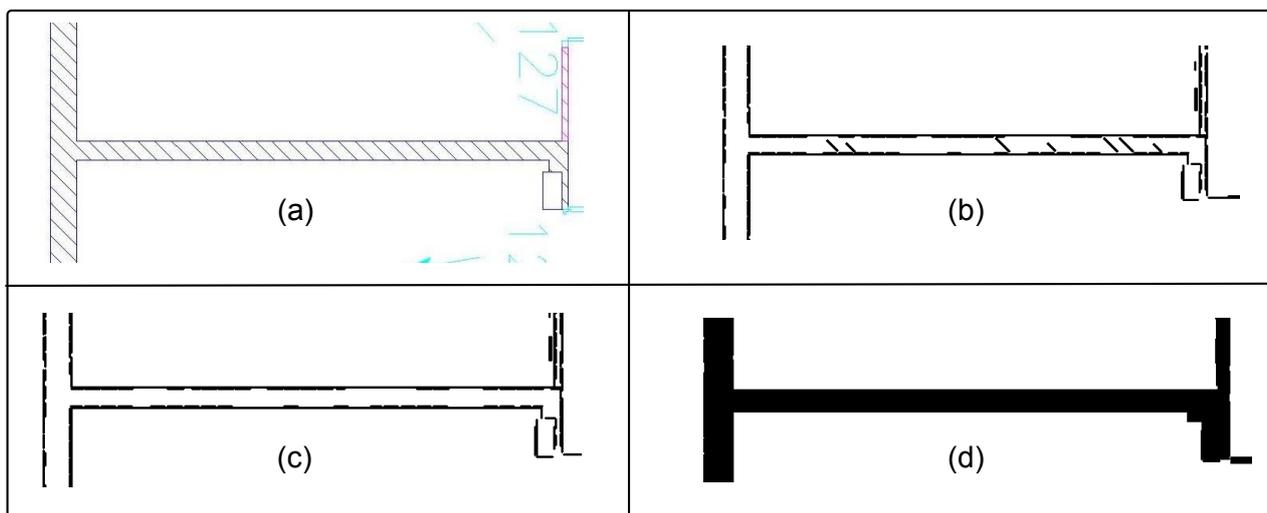


FIGURE 4.6 – Étapes du processus de prétraitement sur une image dont les murs sont des zones texturées par des hachures. (a) l’image originale, (b) résultat de la vectorisation, (c) après suppression des hachures, (d) après modification de la texture.

Les méthodes développées pour traiter les cas où les murs sont représentés par des zones homogènes de pixels blancs ou de hachures font appel à des fonctions déjà existantes en traitement d’image et sont également rapides à exécuter. Dans le cas où de nouvelles

représentations graphiques doivent être traitées, le processus est conçu de façon à pouvoir aisément ajouter un nouveau cas et une nouvelle fonction de prétraitement sans modifier le processus global.

De plus, la fonction de recherche d'ouvrants extérieurs doit elle aussi être modifiée afin de traiter le cas où les murs ne sont pas remplis par des pixels noirs car lors de la création de l'image de validation, les ouvrants sont eux aussi représentés par des ensemble de pixels noirs. Le principe est toujours de rechercher des discontinuités dans l'image originale dans la représentation des murs. Dans les deux nouvelles représentations, un ouvrant est délimité par la présence de deux segments : un au début et un à la fin.

4.2.2 Passage à l'échelle

4.2.2.1 Problématiques

Une autre problématique liée à la généralisation de l'outil concerne le passage à l'échelle par le traitement des plans de grande taille. Les images utilisées jusqu'à présent représentent des maisons individuelles et le temps d'exécution est généralement compris entre 5 et 15 minutes par plan. Sur les images, la surface au sol du bâtiment est inférieure à 250m², le nombre de segments extraits de 1000 ce qui génère initialement une centaine de murs avant l'application des traitements d'extraction d'éléments.

En comparaison, un bâtiment avec une emprise au sol de 1000m² génère environ 9100 segments initiaux et 1100 murs. Cet exemple illustre que le nombre de murs identifiés et donc les traitements nécessaires pour reconstruire la maquette numérique dépendent fortement de la taille initiale du bâtiment.

Il est donc intéressant d'évaluer la robustesse du processus développé sur des plans de bâtiments de grande taille. Cela permet d'évaluer la capacité de l'outil lorsque le nombre d'éléments à traiter augmente fortement ainsi que l'impact de cette augmentation sur le temps d'exécution et le nombre d'interventions utilisateur nécessaires pour reconstruire le bâtiment.

Afin de résoudre ce problème, une solution de l'état de l'art propose de segmenter l'image originale en plusieurs images de taille égale afin d'effectuer les traitements sur chaque sous-partie de l'image puis de fusionner les résultats obtenus [72]. Cependant cette méthode s'adapte difficilement à la méthodologie que nous avons développée car elle requière le fait que le bâtiment soit intégralement inclus dans l'image.

En effet, dans notre processus, des traitements spécifiques sont appliqués aux murs afin de pouvoir identifier tous les liens topologiques et de corriger si nécessaire la géométrie. De plus, lors de la reconstruction de la maquette numérique, la forme extérieure du bâtiment est recherchée en priorité. Si le plan est divisé en plusieurs images, cela implique de revoir intégralement le processus développé ce qui est impossible en l'état. Certaines opérations comme les prétraitements ou la recherche de symboles peuvent s'effectuer sur des sous-échantillonnages du plan initial mais pas la reconstruction du bâtiment.

La principale difficulté liée au passage à l'échelle est le temps d'exécution du programme qui augmente en fonction du nombre d'éléments du bâtiment à traiter. L'étape la plus coûteuse en temps de calcul est la création des murs candidats à partir de l'image

originale. C'est pourquoi, lors des recherches effectuées pour apparier deux segments entre eux afin de créer les murs candidats, des optimisations ont été réalisées pour limiter le nombre de recherches.

Préalablement, l'ensemble des segments est séparé en trois groupes selon leur orientation : les segments verticaux, ceux horizontaux et les obliques. Ainsi, chaque groupe est traité séparément. Afin d'identifier le maximum de murs candidats, le même traitement est appliqué à chaque segment d'un groupe. Pour chacun, tous les segments restants du groupe sont testés pour créer éventuellement des murs candidats puis le segment est supprimé du groupe. Ainsi, à chaque itération, le nombre de segments à tester diminue.

Il pourrait être intéressant de sélectionner plus finement les segments suivant leur longueur afin d'apparier en priorité les segments les plus longs et de n'autoriser un segment à n'être utilisé qu'une fois lors de la création des murs candidats.

4.2.2.2 Informer l'utilisateur lors de la reconstruction de la forme extérieure

Le nombre de questions posées à l'utilisateur a également tendance à augmenter en fonction de la taille du bâtiment ou du nombre d'erreurs initialement identifiées. De plus, aucune information n'est donnée sur la progression du processus. Exceptée l'image représentant les éléments déjà identifiés, mise à jour à chaque question, l'utilisateur n'a aucun indicateur sur le nombre potentiel de corrections à effectuer ou alors l'impact de ses corrections. Nous proposons d'autres indicateurs permettant à l'utilisateur de mieux suivre le processus et d'avoir une estimation du temps restant.

Le premier indicateur que nous avons développé est utilisé lors de la phase de reconstruction de la forme extérieure du bâtiment. Il est destiné à apporter une information sur l'emprise au sol du bâtiment. Pour cela, avant chaque question posée, un calcul de *l'aire topologique* est réalisé puis l'aire est reportée sur un graphique mis à jour à chaque itération. L'aire topologique est calculée grâce au graphe topologique construit au fur et à mesure de la reconnaissance en prenant seulement en compte les murs extérieurs. Elle correspond à un cycle formé par des murs extérieurs en lien.

Le principe est de rechercher un cycle formé par les points topologiques extérieurs et d'en calculer son aire. Cependant, à cette étape de la reconstruction, la forme extérieure du bâtiment n'est pas toujours constituée par un cycle fermé topologiquement et géométriquement. Si des discontinuités sont présentes dans l'enveloppe, alors elle est interpolée en reliant le dernier mur du cycle avec le premier. L'aire topologique est donc une estimation de la surface intérieure reconstruite à un instant donné.

Ce graphe permet de suivre l'évolution de l'aire intérieure en fonction des réponses données par l'utilisateur. Par exemple, pour le plan original représenté en figure 4.7, le graphique associé de l'aire intérieure est représenté en figure 4.8.

Pour quelques valeurs, le graphe permettant de calculer l'aire topologique est représenté. Lors de la deuxième étape, on note que l'aire diminue fortement en passant de 141m^2 à 42m^2 . Cela s'explique par la suppression automatique de liens qui étaient corrects topologiquement mais non géométriquement lors de la phase de vérification. Par la suite, l'enchaînement des étapes permet de reconstruire une forme extérieure cohérente topologiquement et géométriquement.

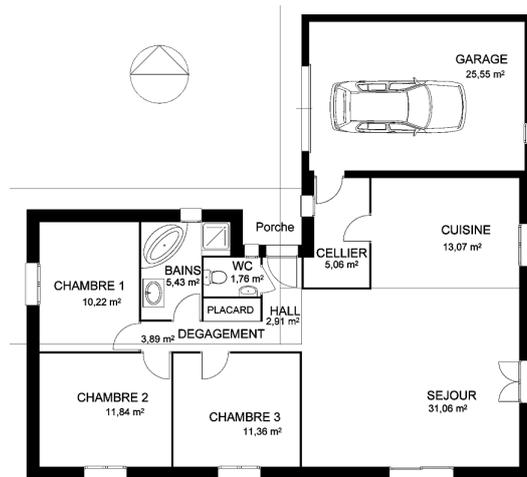


FIGURE 4.7 – Image originale d'un plan d'une maison individuelle.

Le calcul de l'aire topologique au fur et à mesure de la reconstruction permet de suivre l'évolution de la forme extérieure du bâtiment. Le résultat final calculé ici vaut 123m². Si on effectue la somme des aires écrites sur le plan on obtient 122.15m². Le résultat final est précis, à condition que la forme extérieure soit correcte, et permet d'obtenir une bonne approximation de l'aire globale du bâtiment représenté.

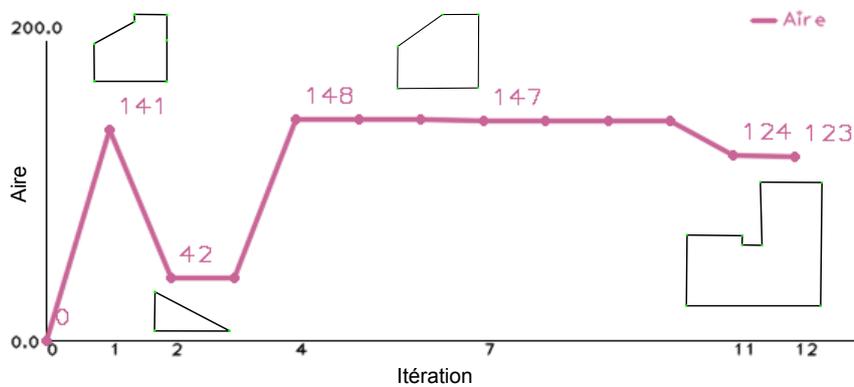


FIGURE 4.8 – Graphique de l'évolution de l'aire topologique au cours du processus de reconstruction semi-automatique de la forme extérieure du bâtiment.

Cependant, avec cette approche, l'aire topologique dépend fortement du point initial choisi pour débiter le cycle. Si au cours du traitement, le graphe de la forme extérieure d'un bâtiment est composé de deux composantes connexes alors une seule sera prise en compte dans le calcul. Une solution est de rechercher l'ensemble des cycles du graphe topologique des éléments extérieurs.

4.2.2.3 Estimer le nombre d'actions restantes

On pourrait également développer une méthodologie pour estimer le nombre restant d'actions. Le processus de reconstruction s'effectue en cinq phases principales :

1. Prétraitements sur l'image originale pour générer l'ensemble des murs candidats.
2. Reconstruction de la forme extérieure du bâtiment.
3. Reconstruction des éléments intérieurs du bâtiment.
4. Identification des espaces.
5. Export 3D.

L'utilisateur intervient dans les phases 2 à 4. La phase 1 est celle qui prend en général le plus de temps et elle dépend de la taille de l'image traitée et du nombre de segments initialement extraits. La 5^{ème} et dernière étape n'est généralement pas très longue et sans intervention humaine.

La principale difficulté d'un tel indicateur est de déterminer lors des différentes phases le temps restant d'exécution ou le nombre d'actions restantes à effectuer. Cette estimation peut être calculée en effectuant de l'apprentissage sur les plans déjà testés et en utilisant les processus mis en place.

Lors de la première étape, les murs candidats sont extraits de l'image originale suite à divers traitements. Au cours de cette étape, aucune intervention utilisateur n'est nécessaire. La complexité est dépendante du nombre de segments extraits de l'image originale. Afin d'estimer le temps d'exécution en fonction du plan original, l'idée est d'utiliser des méthodes d'apprentissage afin de générer un modèle prédictif du temps de cette première phase. Cependant, pour développer un tel indicateur, des données d'apprentissage plus nombreuses et variées sont nécessaires.

Au niveau des corrections demandées à l'utilisateur, l'étape durant laquelle une majorité de questions est posée est celle de la reconstruction de la forme extérieure. L'idée est alors de prédire le nombre de questions restantes en fonction du nombre d'erreurs en cours. Là aussi, on pourrait utiliser un modèle prédictif d'apprentissage en fonction des questions déjà posées sur un ensemble de plans tests. Cependant, on peut déjà estimer ce nombre par un calcul en indiquant une fourchette minimale et maximale en fonction des erreurs présentes en début de phase de reconstruction.

On note n le nombre de murs candidats pour lesquels il manque un lien topologique avec un autre mur extérieur et m le nombre de murs candidats pour lesquels il manque deux liens topologiques. Dans le meilleur des cas, on considère qu'aucun mur extérieur n'est manquant et qu'aucun mur extérieur n'est un faux mur, soit L le nombre de liaisons manquantes on a alors :

$$L = \frac{n + 2m}{2} \quad (4.1)$$

Si chaque question permet la mise en relation de deux murs extérieurs alors le nombre minimum de questions Q_{min} vaut L . Dans le pire des cas, on considère qu'aucun des murs ayant un ou deux liens topologiques manquants n'est en relation avec un autre et qu'entre chaque mur il est impossible de créer automatiquement les murs manquants. Chaque

combinaison de couple sera alors testée et proposée. Dans ce cas, le nombre maximal de questions posées pour les murs dont il manque une relation topologique Q_{max1} vaut :

$$Q_{max1} = n(n - 1 + 2m) \quad (4.2)$$

Chaque mur dont il manque une relation topologique peut être en relation avec tous les autres murs dont il manque une relation sauf lui même et avec les deux extrémités des murs dont il manque deux relations topologiques. Le nombre maximal de questions posées pour les murs dont il manque deux relations topologiques Q_{max2} vaut :

$$Q_{max2} = 2m(n + 2(m - 1)) \quad (4.3)$$

Ce calcul est similaire au précédent car un mur ne peut pas être en lien topologique avec lui même. Ainsi Q_{max} a pour valeur :

$$Q_{max} = Q_{max1} + Q_{max2} \quad (4.4)$$

Dans l'ensemble des plans traités, ce cas de figure arrive exceptionnellement ou alors dans la configuration où $n = 2$ et $m = 0$, c'est à dire qu'il manque entre ces deux murs plus d'un mur ce qui fait au maximum 2 questions.

Dans l'exemple de la figure 4.9, $n = 4$ et $m = 1$. On a alors le nombre de questions posées qui sera compris entre 3 et 28. Dans le meilleur des cas (image de droite), les murs sont directement liés les uns aux autres. Dans le pire des cas (image du milieu), au minimum deux murs sont manquants entre chaque couple de murs ce qui ne peut pas se résoudre par les questions posées. L'utilisateur est alors obligé de dessiner les murs manquants. Cette estimation théorique mériterait d'être affinée grâce à d'autres calculs mais elle permet une bonne approximation.

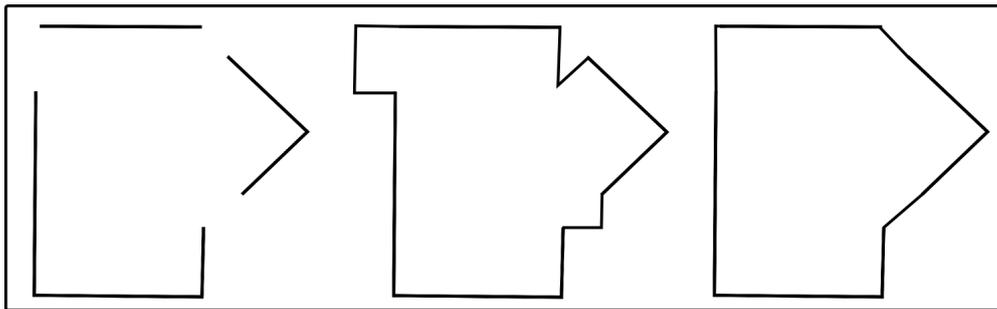


FIGURE 4.9 – Exemple de calcul du nombre minimal et maximal de questions posées. A gauche, l'état initial, l'image de droite représente le pire des cas et l'image de droite le meilleur des cas concernant le nombre de questions posées.

Toutes les améliorations proposées ne modifient pas le processus mis en place. Cependant, elles permettent un gain de temps lorsque le nombre d'éléments du bâtiment à traiter augmente. Des outils pour mieux guider l'utilisateur au cours du processus ont également été proposés.

4.2.3 Extension à la construction multi-niveaux

La dernière problématique abordée dans les travaux concernant la généralisation des plans est la reconstruction de bâtiments comportant plusieurs étages. Dans sa version actuelle, le processus développé ne considère qu'un seul plan et donc un seul étage à la fois dans le cas où une image contient seulement le plan d'un étage. Travailler sur un bâtiment à plusieurs étages requiert des modifications et adaptations du processus actuel.

La principale difficulté dans la gestion des étages est liée au recollement des étages entre eux afin qu'ils forment un bâtiment cohérent sans décalage. Les plans n'ont pas forcément la même échelle de représentation ni le même positionnement dans l'image originale. C'est pourquoi, il faut définir un étage de référence sur lequel les autres pourront être recalés, en général le rez-de-chaussée au niveau du sol.

De plus, suivant la configuration du bâtiment, deux étages n'ont pas toujours la même forme extérieure, un étage peut comporter des terrasses et un autre non par exemple. Ainsi, on ne peut pas simplement dupliquer les murs d'un étage à un autre même si des similitudes sont présentes entre les deux. Deux stratégies différentes ont alors été étudiées.

La première solution envisagée est de traiter les différents étages simultanément. La figure 4.10 illustre cette proposition. Le système prend alors en entrée l'ensemble des images représentant chaque étage et réalise la conversion dans un unique processus. Ainsi, les murs similaires d'un étage à l'autre sont recalés par rapport à l'étage de référence. Une fois la maquette validée en interne, elle est alors exportée dans un format compatible avec le BIM.

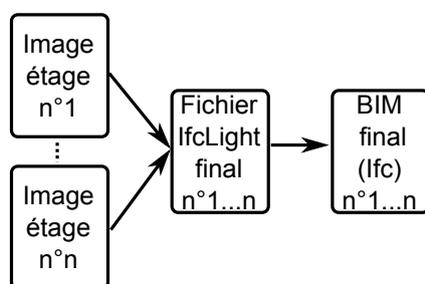


FIGURE 4.10 – Processus n°1 de fusion de deux étages.

Une telle solution nécessite cependant d'apporter des modifications majeures au processus développé. En effet, même si une classe *Étage* a été prévue dans le modèle de données utilisé, cette information n'est pour l'instant pas exploitée dans les différents traitements. La maquette numérique est jusqu'à présent conçue sur un seul niveau en utilisant directement la classe associée aux étages qui est *ElementBati*. Il faut alors créer une couche supplémentaire dans l'architecture du prototype pour gérer plusieurs étages lors des traitements. Il faut aussi pouvoir déterminer automatiquement les murs homologues entre l'étage traité et celui choisi comme référence pour réaliser les différents recalages et ajustements.

Les atouts de cette solution sont nombreux : possibilité de repercuter les corrections sur l'ensemble des étages, meilleure précision dans le calage ou encore gestion des escaliers rendue possible. Cependant, suivant la configuration du bâtiment et des différents niveaux, la gestion de plusieurs étages simultanément risque d'entraîner une complexité de

traitement accrue. L'augmentation du nombre d'objets traités peut également augmenter le nombre d'interventions utilisateurs.

La deuxième solution envisagée consiste à réaliser le calage a posteriori et l'ajustement des étages avant l'export vers un format compatible avec le BIM, l'IFC dans ce cas. Dans un premier temps, l'image contenant l'étage servant de référence est traitée entièrement. Ensuite, les autres étages sont aussi traités séparément et les seules informations apportées par l'étage de référence sont les coordonnées du mur de référence afin de recalibrer l'ensemble de l'étage en cours de traitement par rapport au mur de référence. Ce mur de référence ainsi que les paramètres de translation et éventuellement de mise à l'échelle pourront être dans un premier temps renseignés par l'utilisateur. A noter qu'une solution alternative est de réaliser un calage des images de plan avant de lancer le processus de conversion vers la maquette numérique.

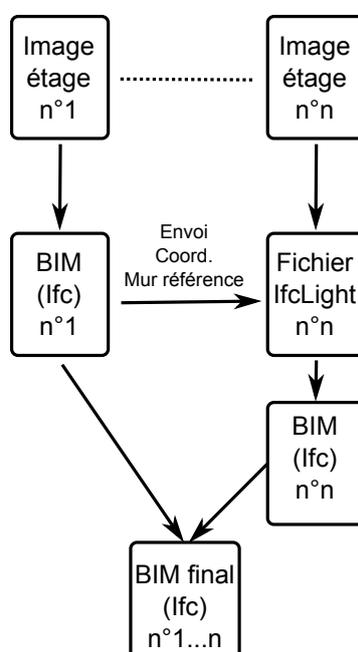


FIGURE 4.11 – Processus n°2 de fusion de deux étages.

Ces deux solutions sont différentes (cf. figures 4.10 et 4.11) car la précision de l'alignement des étages obtenue n'est pas la même ainsi que le nombre de modifications nécessaires pour implémenter ces traitements complémentaires. La première solution est la plus précise car elle intègre directement la gestion des étages dans le processus général. Le bâtiment est entièrement contenu dans un modèle de données unique ce qui permet de mettre en place par la suite de nouvelles vérifications et validations sur les liens entre éléments contenus dans divers étages. Cependant, cette solution nécessite des développements supplémentaires afin d'identifier automatiquement les murs homologues entre étages pour réaliser les ajustements géométriques nécessaires.

La deuxième solution permet un recalage par rapport à des points de référence en effectuant une translation d'un étage par rapport à un autre. Dans ce cas là, aucun lien n'est défini entre les éléments de chaque étage. Le calage obtenu sera moins précis que

pour la solution précédente car une simple translation avec une mise à l'échelle et non un ajustement des différents murs est réalisée. Cependant, cette solution a l'avantage de pouvoir être directement mise en œuvre car il suffit simplement de calculer préalablement le décalage entre les images puis de modifier les coordonnées de chaque élément du bâtiment avant l'export de la maquette numérique. Les deux fichiers IFC sont ensuite fusionnés pour générer un fichier contenant tous les étages du bâtiment.

Dans cette partie, les extensions envisagées pour permettre une généricité dans les plans utilisés comme donnée d'entrée du prototype de conversion d'un plan 2D scanné en maquette numérique 3D ont été présentées. La partie suivante illustre les solutions développées grâce à des tests réalisés sur des plans d'origine et de charte graphique variées.

4.2.4 Applications et performances sur d'autres représentations

Afin d'évaluer les méthodologies proposées pour traiter des plans de représentations variées, des tests ont été réalisés sur divers plans. Ils proviennent principalement de deux sources, ils ont été fournis par une agence immobilière parisienne ainsi que par le CEA Saclay. Avant de lancer le programme de conversion de l'image en une maquette numérique 3D, quelques paramètres propres au plan doivent être renseignés par l'utilisateur. Cinq paramètres sont nécessaires :

1. L'échelle utilisée pour représenter le plan (nombre de pixels pour représenter un mètre).
2. L'épaisseur minimale en pixels autorisée pour la reconstruction des murs.
3. L'épaisseur maximale en pixels autorisée pour la reconstruction des murs.
4. Le type de représentation graphique des éléments et plus particulièrement celle des murs.
5. Le degré d'implication de l'utilisateur.

Les 4 premiers paramètres ont l'avantage d'être directement contenus dans l'image originale et de pouvoir être récupérés facilement (en automatique ou par l'utilisateur).

Concernant le type de représentation graphique utilisé, l'utilisateur indique seulement le type de texture utilisé pour les murs parmi les trois proposées : zones homogènes remplies de pixels noirs, de pixels blancs ou de hachures. Le dernier paramètre permet d'indiquer si la reconnaissance se fait en mode tout automatique ou semi-automatique en faisant appel à des interventions utilisateurs si nécessaire.

4.2.4.1 Plans d'appartements anciens

Afin de tester et d'évaluer la robustesse des méthodes développées sur des plans de sources différentes, nous avons utilisé des images d'appartements de style haussmannien vendus à Paris par l'agence immobilière *Appartement-Haussmannien.com*¹. Elle a été fondée en 2010 par Mr. Christophe Bouchet avec la particularité d'être une agence 100% numérique. Actuellement, lorsque des plans sont fournis à l'agence, ceux-ci sont régulièrement nettoyés et retouchés manuellement avant d'être mis en ligne sur le site afin d'être plus lisibles par d'éventuels acquéreurs. C'est un travail fastidieux et coûteux en temps.

1. <http://appartement-haussmannien.com/>

L'intérêt que pourrait avoir cette agence d'utiliser un tel processus est double. Tout d'abord, cela permettrait aux agents de gagner du temps lors du traitement des plans originaux. De plus, avec l'émergence des données 3D, donner la possibilité aux futurs acquéreurs de visualiser la maquette 3D et de pouvoir visiter virtuellement un bien en ligne serait un réel avantage.

Des tests sur différents plans de qualité variable ont été réalisés et nous illustrons les résultats à partir d'un plan en particulier.

Pour le plan que nous proposons d'analyser (cf. figure 4.12), les murs ont été dessinés manuellement à partir de l'image originale de plan que nous ne possédons pas. La qualité de l'image est moyenne puisque des traits ne sont pas systématiquement visibles notamment sur la droite de l'image.

De plus, on peut remarquer qu'il est quasiment impossible de reconnaître automatiquement les portes dans ce plan. Une porte est seulement définie par deux petits rectangles un peu plus contrastés que le reste des éléments ce qui est difficile à extraire automatiquement et peu lisible, même par un humain. Les murs sont représentés par des zones homogènes remplies de pixels blancs.

Un seul étage est présent sur cette image et la taille de la surface est du même ordre que pour les tests précédents. Ce plan permet donc d'évaluer la robustesse du processus par rapport à la représentation et la qualité de l'image originale.

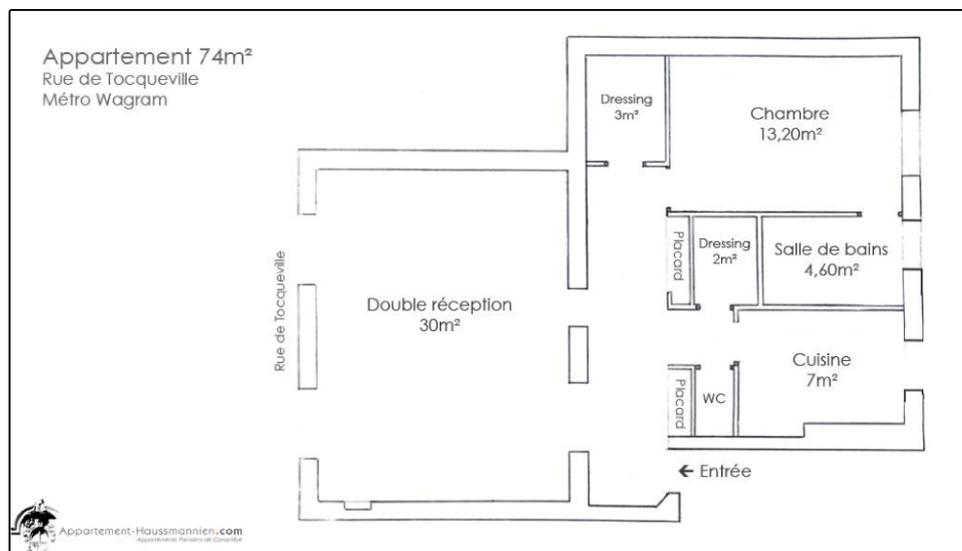


FIGURE 4.12 – Image originale d'un plan d'appartement où les murs sont représentés par des zones homogènes de pixels blancs.

La figure suivante 4.13 montre le résultat obtenu après un processus de reconstruction semi-automatique. Le temps d'exécution incluant les interventions utilisateurs est de cinq minutes. Afin de reconstruire la forme extérieure, 10 questions ont été posées et un mur extérieur a été dessiné.

Au niveau de la reconstruction intérieure, beaucoup d'éléments ont du être dessinés : 13/16 murs et 6/6 portes. Ce chiffre élevé s'explique en partie par la représentation des portes qui ne permettent pas une reconnaissance automatique. Lorsqu'une porte est iden-

tifiée, la géométrie des murs concernés est corrigée, ce qui n'a pas pu être le cas ici d'où un nombre important de murs qui ont dû être en partie dessinés manuellement.

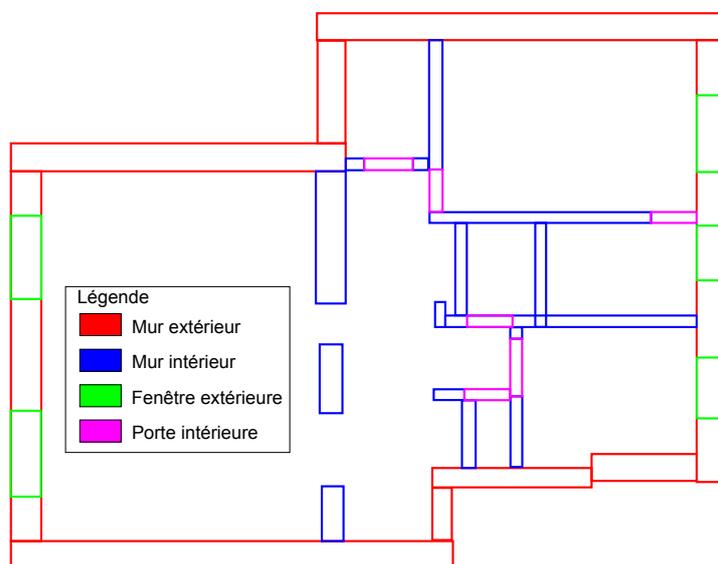


FIGURE 4.13 – Résultats de la reconnaissance semi-automatique du plan de la figure 4.12. Les murs extérieurs sont représentés en rouge, ceux intérieurs en bleu. Les fenêtres sont en vert et les portes en rose.

La principale difficulté du traitement de ces plans est que chacun est différent en terme de qualité et de représentation. Ils illustrent la capacité de l'approche à traiter des plans avec une qualité moindre et des représentations graphiques de murs différentes.

Par rapport aux images de la base test, celui présenté ici est plus représentatif des plans qui sont amenés à être convertis. Les images sont issues de plans scannés et leur configuration extérieure et intérieure est plus complexe et pas toujours facile à interpréter même par un humain. La représentation des portes intérieures est toujours difficile à réaliser, sur d'autres plans elles ne sont même pas représentées. Il est alors quasiment impossible de pouvoir les identifier automatiquement ou grâce à un opérateur sans aller visiter l'appartement ou utiliser les photos prises lors d'une visite sur site par exemple.

4.2.4.2 Plans de bâtiment de plus grande dimension

Afin d'évaluer l'outil développé sur des plans de grande taille et comportant plusieurs étages, des plans du CEA Saclay ont été utilisés. Les tests ont principalement porté sur deux plans : le rez-de-chaussée et le premier étage d'un même bâtiment. Ces plans ont plusieurs caractéristiques particulières.

Les deux étages n'ont pas la même superficie et forme. Il est donc impossible de faire une reconnaissance du rez-de-chaussée et d'en copier le résultat afin de construire le premier étage. L'emprise au sol vaut 1097m^2 , ce sont donc des plans beaucoup plus grands que ceux traités précédemment. Ces plans ont aussi la particularité d'être constitués de murs symbolisés par des hachures.

Afin d'évaluer le passage à l'échelle des méthodes développées, nous avons tout d'abord réalisé des tests en version automatique avant de réaliser ceux en version semi-automatique.

La figure 4.14 est un extrait de l'image de plan du rez-de-chaussée. La qualité des images est bonne, les tests réalisés sont destinés à évaluer la robustesse du processus concernant le traitement des hachures et le passage à l'échelle.

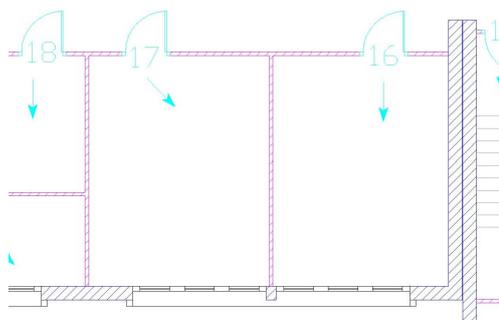


FIGURE 4.14 – Extrait du plan du rez-de-chaussée du bâtiment.

Le tableau 4.1 est un récapitulatif des principaux résultats obtenus lors de la conversion en mode tout automatique des deux images d'étages de ce bâtiment. Ces résultats sont calculés en ne prenant pas en compte la distinction sémantique entre les éléments intérieurs et extérieurs et entre les portes et fenêtres. Les résultats concernant les murs sont exprimés en nombre de mètres linéaires de murs bien reconnus et ceux sur les ouvrants en nombre d'ouvrants correctement identifiés dans le plan.

TABLE 4.1 – Résultats du processus automatique de conversion des plans de deux étages d'un même bâtiment.

Plan	Temps (mn)	Nbre murs initial	Murs reconnus (m)	Ouvrants reconnus (nbre)	Murs inexistants (m)	Ouvrants inexistants (nbre)
Rdc	17	1111	91.18%	45.68%	22.29%	12.43%
1 ^{er}	8	582	92.40%	66.35%	8.87%	11.11%

Le temps d'exécution est dépendant du nombre initial de murs identifiés dans le plan, cependant, avec deux plans testés, il apparaît difficile de prédire une tendance générale du temps d'exécution en fonction du nombre initial de murs.

Ces résultats sont différents de ceux réalisés avec la base d'images de plan dans le chapitre 2. Ils sont meilleurs en terme d'éléments reconnus mais plus d'éléments inexistants sont créés que précédemment. On note qu'environ 91% de mètres de murs linéaires ont été correctement identifiés bien que des erreurs sémantiques entre murs intérieurs et extérieurs sont présentes. Pour le rez-de-chaussée, 10% des murs extérieurs ont été reconnus comme étant des murs intérieurs. De plus, beaucoup de portes intérieures sont manquantes, en particulier pour le 1^{er} étage, il en manque 60%.

Finalement, le processus automatique permet d'identifier un grand nombre de murs mais peu d'ouvrants. Au niveau des portes intérieures, cela peut s'expliquer par la qualité de l'image qui est moins bonne que lors des tests précédents d'où une difficulté pour

retrouver les arcs de cercle permettant dans ce plan d'identifier les portes.

De plus, beaucoup d'éléments inexistants ont été générés pendant la reconstruction, de 9% à 23% suivant les plans et le type d'objets. Les erreurs les plus fréquentes dans les images générées sont des murs créés autour des portes ainsi que des escaliers qui n'ont pas été identifiés comme tels et qui génèrent des éléments inexistants.

La figure 4.15 est un extrait du rez-de-chaussée où la présence d'un escalier a généré plusieurs murs inexistants. De plus, un autre mur inexistant a été créé à droite de l'arc de cercle représentant la porte en haut de l'image.

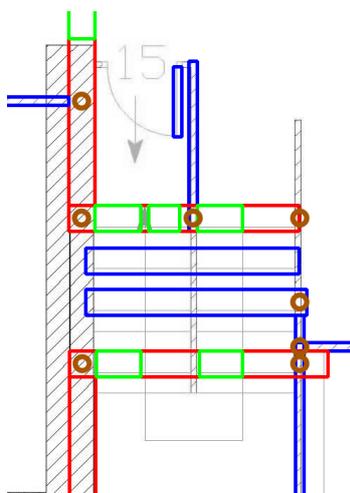


FIGURE 4.15 – Extrait de la reconnaissance automatique autour d'un escalier. Des éléments inexistants sont générés.

L'enveloppe externe du bâtiment est en forme de U, lors du nettoyage des murs intérieurs après reconstruction de la forme extérieure, ceux positionnés à l'intérieur du U mais à l'extérieur du bâtiment sont conservés, en raison de l'hypothèse de forme convexe et non concave du bâtiment, alors que cela ne devrait pas être le cas. C'est pourquoi, davantage de murs inexistants ont été créés pour le rez-de-chaussée car du mobilier urbain tel que des abris pour vélos ou des escaliers extérieurs sont identifiés comme des murs.

Des tests en version semi-automatique ont également été réalisés. La majorité des actions de l'utilisateur sont de nettoyer le plan en supprimant des murs, de valider la présence ou non de portes et de redessiner principalement des portes intérieures et quelques murs intérieurs.

Au niveau de la forme extérieure, les questions posées ont permis de la corriger entièrement. La figure 4.16 représente la forme extérieure du bâtiment avec la surface occupée par le premier étage. Cette différence de superficie entre les deux étages explique l'écart de temps de traitement et du nombre de murs initial.

En comparaison avec les tests réalisés dans le chapitre 3, le nombre de questions ou de dessins complémentaires est plus élevé. Cela s'explique par la surface du bâtiment, et le fait qu'un nombre important d'éléments inexistants sont créés, il faut alors les supprimer afin d'éviter la propagation d'erreurs. Les résultats sont présentés dans le tableau 4.2.

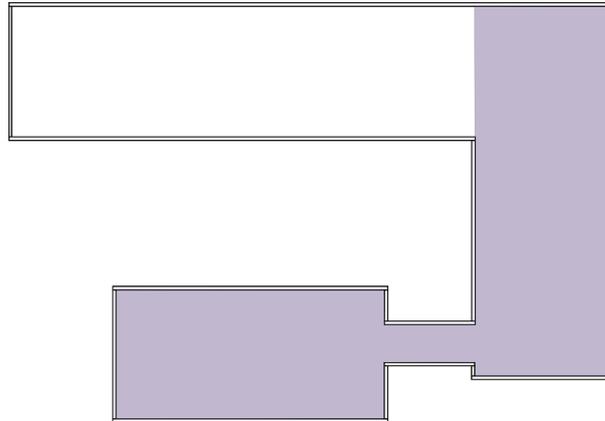


FIGURE 4.16 – Forme extérieure du bâtiment, le contour en noir représente le rez de chaussée et la surface colorée l’emprise du premier étage.

TABLE 4.2 – Résultats sur la conversion semi-automatique des plans de deux étages d’un même bâtiment.

Plan	Temps (mn)	Nbre murs initial	Murs reconnus (m)	Ouvrants reconnus (nbre)	Murs inexistants (m)	Ouvrants inexistants (nbre)	Nbre questions	Nbre dessins
Rdc	70	1111	96.32%	93.79%	12.49%	4.73%	154	75
1 ^{er}	29	582	97.14%	99.44%	7.31%	4.55%	64	66

Le traitement semi-automatique a entraîné une augmentation considérable des taux de bonne reconnaissance et une diminution des éléments inexistants. Le rez-de-chaussée est toujours composé de 12.49% de mètres de murs linéaires qui n’en sont pas.

Quasiment tous les murs et tous les ouvrants sont identifiés dans le plan. L’influence de la taille du plan joue un rôle dans le nombre de questions posées et de dessins complémentaires nécessaires à la reconstruction du bâtiment.

La qualité du plan est aussi importante. Au premier étage, une fausse fenêtre a été générée dans un mur extérieur. L’explication se trouve sur l’image d’origine où une portion de mur n’est pas remplie de hachures comme les autres. Il est alors converti en fenêtre extérieure. Ce cas particulier est représenté dans la figure 4.17.

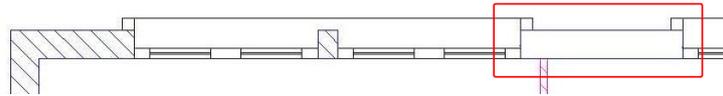


FIGURE 4.17 – Le mur à droite de l'image n'est pas rempli de hachures comme les autres. Lors de la recherche d'ouvrant, il est alors identifié comme une fenêtre extérieure.

L'étude de ce bâtiment réel a également permis de tester le processus de recalage entre étages. Le premier étage a été translaté pour être positionné par rapport au rez-de-chaussée, il n'était pas nécessaire de réaliser dans ce cas là une mise à l'échelle. Cela a entraîné quelques décalages entre les deux étages mais permet une visualisation du bâtiment complet dans un logiciel compatible avec le format IFC. La figure 4.18 est un extrait de la maquette numérique générée par ce traitement.

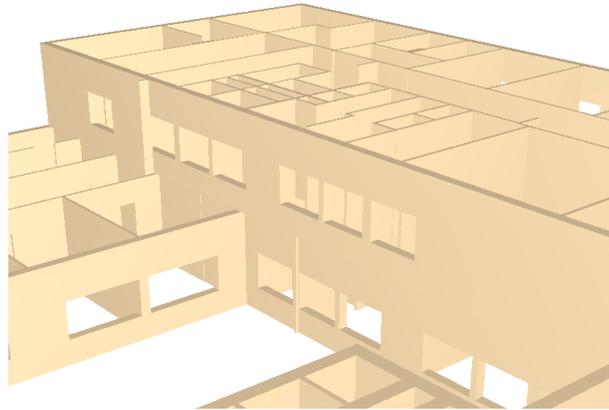


FIGURE 4.18 – Image de la maquette numérique générée par recollement des deux étages.

4.2.4.3 Estimation du temps d'exécution du processus

Les tests réalisés dans cette partie ont permis de traiter des plans différents de ceux de la base d'images de plans. Comme évoqué précédemment, il serait intéressant de disposer de méthodes pouvant estimer le temps des prétraitements.

Les figures 4.19 et 4.20 représentent respectivement le nombre de murs candidats identifiés dans le plan et le temps d'exécution de la première phase du processus en fonction du nombre de segments initialement extraits dans l'image.

Ces deux graphiques mettent en évidence le manque de plans ayant un nombre de segments initialement compris entre 2000 et 6000 pour déterminer une tendance globale. On peut émettre l'hypothèse que le ratio entre le nombre de murs candidats et le nombre de segments est de l'ordre de dix et que le temps d'exécution augmente linéairement en fonction du nombre de segments initial. Dans les données présentées, les deux plans d'étages du bâtiment ont la particularité d'avoir des murs remplis de hachures et de représenter des étages complets plutôt que des maisons individuelles ce qui augmente le temps d'extraction des murs candidats.

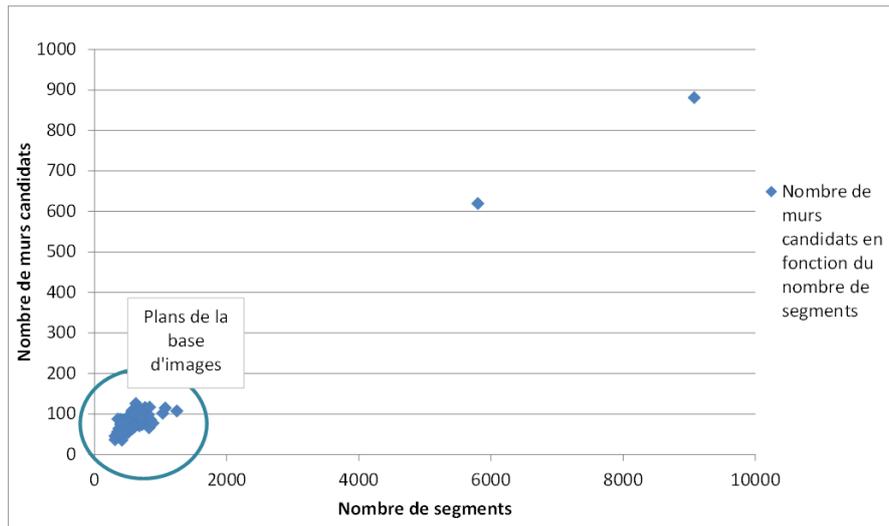


FIGURE 4.19 – Graphique du nombre de murs candidats identifiés en fonction du nombre de segments extraits de l'image originale.

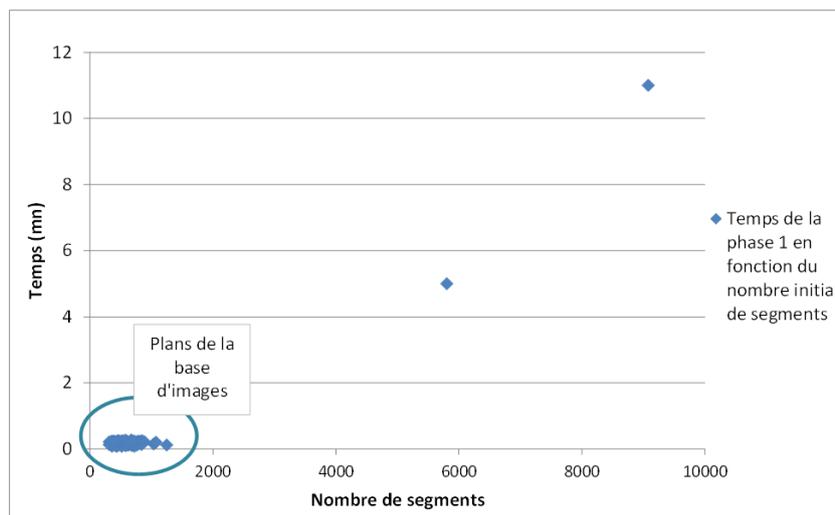


FIGURE 4.20 – Graphique du temps d'exécution de la phase de prétraitement de l'image en fonction du nombre de segments extraits.

Afin de pouvoir estimer réellement le temps d'exécution, il serait intéressant de réaliser des tests sur d'autres sources de plans représentant des bâtiments de diverses tailles avec une diversité de symboles. Cela permettrait de quantifier au plus tôt la durée de la phase de reconnaissance automatique.

Les méthodes présentées dans cette partie ont permis de valider la robustesse du processus pour la diversité de représentations graphiques des plans, le passage à l'échelle et la gestion des bâtiments à plusieurs niveaux.

De nouvelles méthodes ont été développées qui ne modifient pas le processus général présenté dans les chapitres 2 et 3 mais qui permettent de traiter une plus grande diversité de plans en créant automatiquement une image en début de traitement afin d'en extraire les murs candidats.

Les tests effectués sur divers plans sont prometteurs au niveau des performances de reconnaissance mais ne permettent pas encore de mettre en place un modèle prédictif du temps d'exécution ou du nombre d'actions à réaliser par manque de diversité dans les données. Cependant, ces pistes sont prometteuses pour évaluer le temps nécessaire à la reconstruction de la maquette.

4.3 Diversité des utilisateurs

Le processus développé a pour vocation d'être appliqué par divers acteurs du bâtiment afin de générer des maquettes numériques 3D à partir d'images de plans scannés. Nous avons décidé de réaliser une phase de tests complémentaires de l'aspect méthodologique sur un ensemble de personnes à profils variés afin de valider notamment le procédé de questions posées à l'utilisateur et de définir des pistes d'amélioration.

4.3.1 Déroulement de la phase de tests

L'objectif de cette étude est de faire tester l'outil développé à des personnes ne l'ayant jamais utilisé. Ces tests ont pour but d'évaluer si le processus de questions est adapté et permet à l'utilisateur de reconstruire en un temps raisonnable des maquettes numériques complètes et cohérentes.

La durée maximale d'un test a été fixée à une demi-heure. Ce temps paraît raisonnable car c'est un bon compromis entre le temps de prise en main de l'outil et le temps qu'une personne peut y consacrer sachant que chaque test doit se dérouler individuellement. Ce temps comprend les étapes suivantes :

1. Présentation du contexte et du processus de conversion semi-automatique.
2. Présentation d'un exemple type.
3. Tests par l'utilisateur.

Les deux premières étapes permettent au testeur de comprendre le contexte du projet et la méthodologie mise en place pour transformer l'image de plan en maquette numérique 3D. L'exemple type a été choisi car il pose les questions les plus courantes et cela permet au futur utilisateur de comprendre la logique et d'apprendre à utiliser l'outil.

L'utilisateur est ensuite amené à tester de lui-même l'outil sur deux exemples choisis dans la base de données test. Ces plans sont les mêmes pour tous les testeurs et ils ont été sélectionnés car ils sont à la fois simples à analyser et représentatifs de différents cas de figure pouvant se produire. Ces deux plans sont présentés en figure 4.21. Le premier plan testé par l'utilisateur est celui de gauche et le deuxième celui de droite.

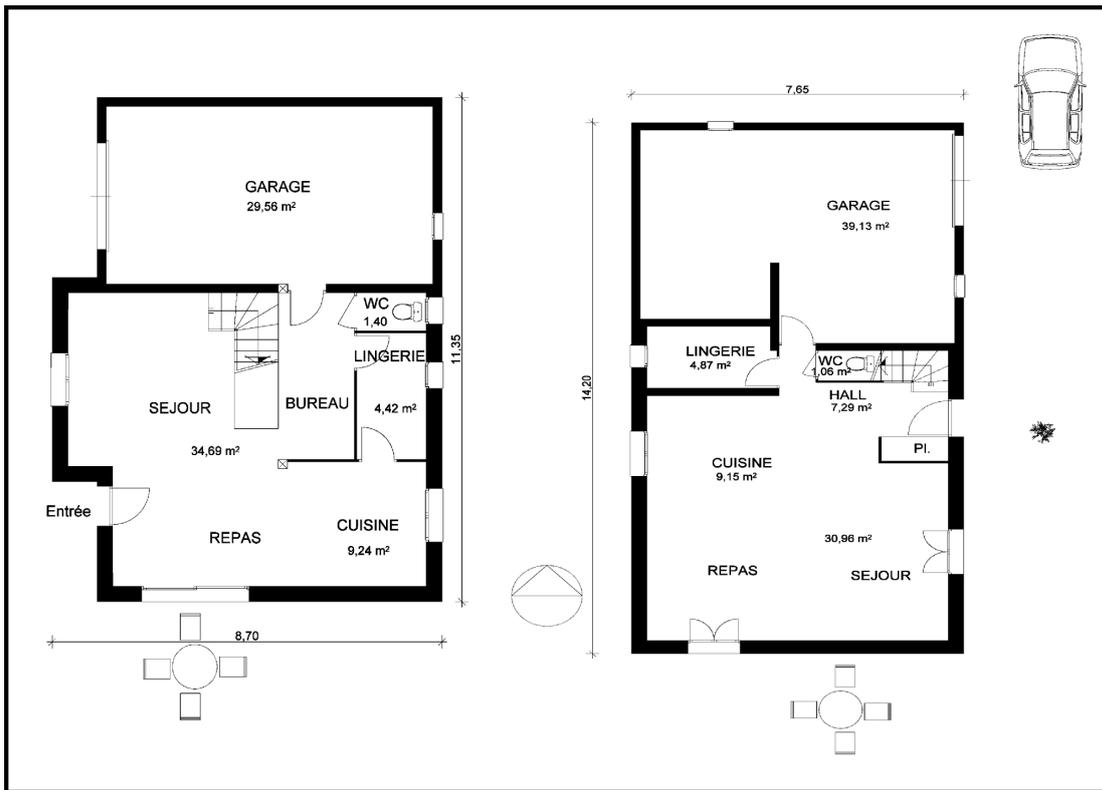


FIGURE 4.21 – Les deux plans utilisés lors des tests utilisateurs. Le premier traité par le testeur est celui de gauche et le deuxième celui de droite.

Le premier plan a été sélectionné car aucune question n'est posée pendant la phase de reconstruction des éléments intérieurs. Cela diminue le nombre d'actions différentes à réaliser afin de s'approprier l'outil par un exemple simple. Seulement quelques questions sont posées pour la reconstruction de la forme extérieure et des dessins complémentaires de murs et de portes sont nécessaires à la fin du processus de reconstruction intérieure.

Le deuxième est aussi intéressant car la voiture présente dans le plan génère la création de petits murs qui entraînent des incohérences dans la reconstruction de la forme extérieure. L'utilisateur doit alors indiquer que ces murs ne font pas partie de la forme extérieure afin de nettoyer le plan. C'est une situation fréquente lors de cette étape de la reconstruction. Au niveau des éléments intérieurs, l'utilisateur doit être vigilant lors de la création des portes notamment sur les épaisseurs proposées. Par exemple, la porte de la lingerie crée des confusions car il faut identifier le petit mur en haut de la porte.

Le deuxième plan présente donc plus de difficultés et de subtilités lors des interventions que le premier. Ces plans ont également l'avantage de pouvoir être traités en une dizaine de minutes suivant les utilisateurs et requièrent un nombre limité d'interventions. Ainsi, les explications et l'exemple sur un plan type durent une dizaine de minutes puis l'utilisateur prend environ une vingtaine de minutes pour traiter les deux plans.

4.3.2 Résultats des tests utilisateurs

Dans cette partie, nous présentons l'échantillon défini pour réaliser les tests ainsi que les principaux résultats de cette phase de tests.

4.3.2.1 Définition de l'échantillon

Trois groupes différents d'individus ont été créés afin de classer les utilisateurs en fonction de leurs compétences vis-à-vis du domaine :

- **Groupe 1** : les personnes ayant des compétences dans le bâtiment : ingénieur dans le bâtiment, architecte, géomètre ou travaillant avec des maquettes numériques de bâtiment.
- **Groupe 2** : les personnes ayant des compétences informatiques que ce soit dans le développement informatique ou l'utilisation courante de logiciels.
- **Groupe 3** : le groupe témoin composé de personnes n'ayant pas de compétence en lien avec l'application.

Le premier groupe cible des personnes qui pourraient être amenées à utiliser plus tard ce type d'outil dans un contexte professionnel. Le deuxième groupe est composé de personnes pouvant aisément comprendre le logiciel et sa logique, ce qui apporte un regard technique différent. Le troisième groupe, constitué de personnes n'ayant aucune compétence bâtiment ou informatique permet de tester la facilité de prise en main et la pertinence des questions posées à l'utilisateur. A travers ce groupe, nous souhaitons aussi évaluer si des différences existent en termes de temps et de résultats avec des personnes ayant déjà diverses compétences.

4.3.2.2 Analyse des résultats

Lors des tests utilisateurs, le temps d'exécution et le taux de reconnaissance obtenu pour chaque plan ont été enregistrés. Lors de cette évaluation, tous les éléments avec leur propriété sémantique sont pris en compte. Pour le premier plan, le Jaccard Index obtenu lors des tests automatiques est de 71.79% et pour le deuxième plan il vaut 82.47%. Dans le chapitre 3, les performances étaient de 90.67% pour le premier plan et de 93.78% pour le deuxième plan.

Les tests ont été réalisés sur un échantillon de 22 personnes dont 7 font partie du groupe 1 (bâtiment), 9 appartiennent au groupe 2 (informatique) et les 6 autres personnes sont rattachées au groupe 3 (groupe témoin).

La figure 4.22 récapitule pour chaque individu le temps passé sur chaque plan et le Jaccard Index obtenu. L'ordre d'affichage des résultats correspond à l'ordre de passage lors des tests, les trois groupes définis précédemment ne sont pas représentés ici.

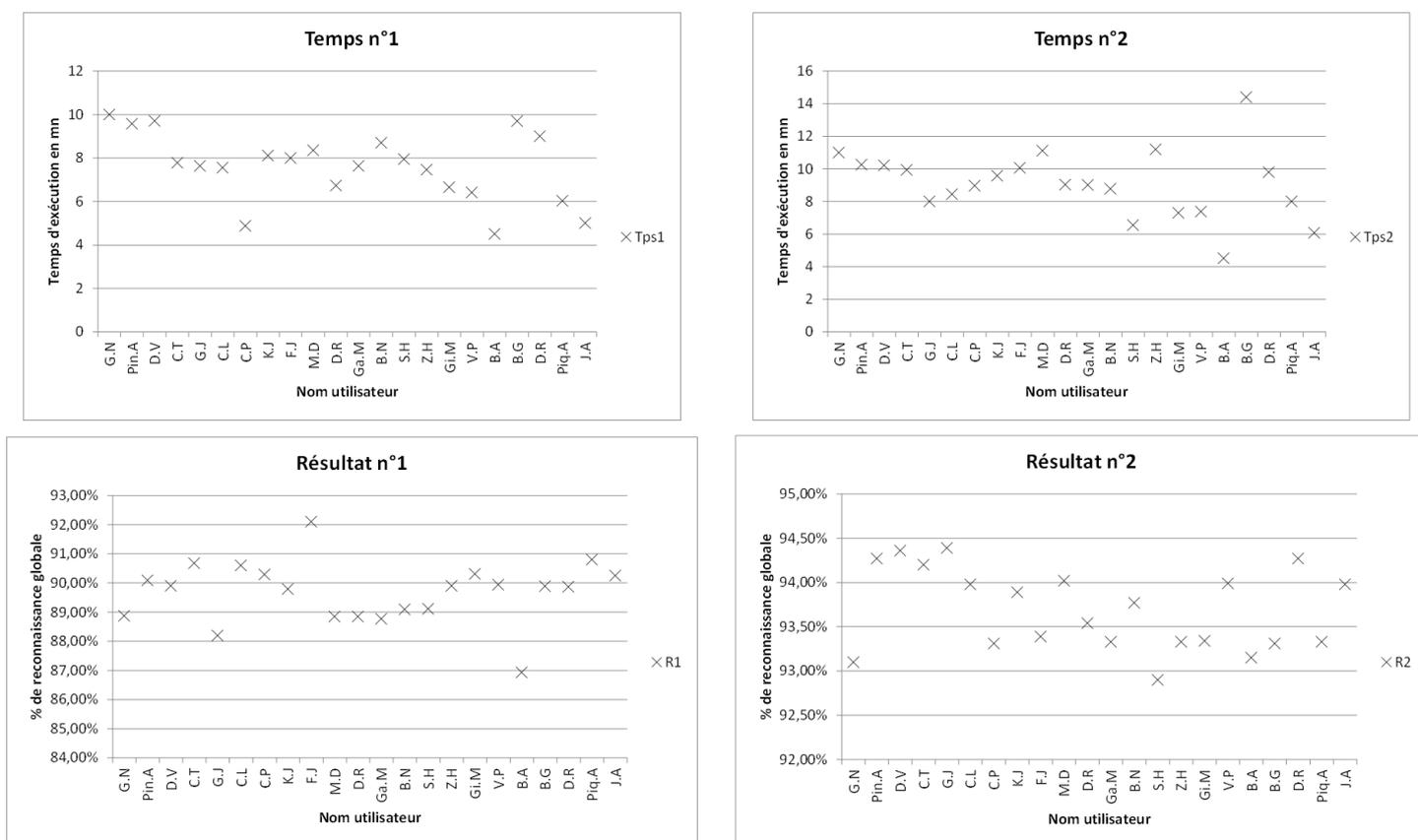


FIGURE 4.22 – Résultats obtenus par chaque testeur pour les deux plans. L'ordre des utilisateurs correspond à l'ordre chronologique des tests, du premier testeur au dernier.

Quelques remarques générales peuvent être faites sur ces premiers résultats. Les temps d'exécution pour le premier plan varient entre 5 et 10 minutes. La moyenne est de 7,5mn pour le premier plan et de 9mn pour le deuxième. On observe bien cette différence sur le graphique avec des valeurs moins centrées et des durées en majorité supérieures à 8mn sur le deuxième plan. Le deuxième plan était plus complexe que le premier avec plus de questions posées notamment sur les éléments intérieurs.

Une personne a mis un peu plus de 14 minutes pour traiter le deuxième plan. C'est une personne plus attentive durant la lecture de l'ensemble des questions et qui a bien vérifié chaque proposition avant de choisir. A l'inverse de "B.A" qui est allé très vite sur les deux plans et qui a obtenu de moins bons résultats.

Pour les deux plans, les résultats obtenus lors de la reconnaissance permettent d'augmenter le Jaccard Index d'environ 18% pour le premier plan et de 10% pour le deuxième par rapport au processus automatique. On remarque cependant qu'une personne a obtenu un bien meilleur taux de reconnaissance que les autres pour le premier plan (92%). Cette différence s'explique en partie par la précision du dessin complémentaire réalisé et l'attention portée aux éléments manquants.

Les résultats sur le second plan sont plus centrés autour de la moyenne et l'écart type est plus petit que pour le premier plan. Cette fois-ci, les données sont plus uniformes et aucun utilisateur ne se détache du groupe. Au vu de ces premiers résultats, on peut aussi noter qu'il ne semble pas y avoir de lien entre le temps d'exécution et de traitement et le résultat obtenu sur la reconnaissance globale.

De plus, l'ordre de passage n'a lui non plus aucune influence sur les résultats alors que les indications données en introduction étaient de plus en plus rodées au fur et à mesure des tests. On aurait pu avoir de meilleurs résultats ou des temps de plus en plus courts en raison d'explications plus claires et adaptées.

La figure 4.23 regroupe les résultats en classant cette fois-ci les individus appartenant au même groupe afin de les comparer. Lors du test sur le premier plan, les trois groupes ont en moyenne pris le même temps, le groupe 1 a une moyenne de 7.6mn contre 7.7mn pour le groupe 2 et 7.5mn pour le groupe 1. Lors du deuxième test, le groupe 3 est celui qui est allé le plus vite avec une moyenne de 8.6mn contre 9.5mn pour le groupe 2 et 8.9mn pour le groupe 1. Cette différence s'explique en partie par le comportement adopté lors des tests.

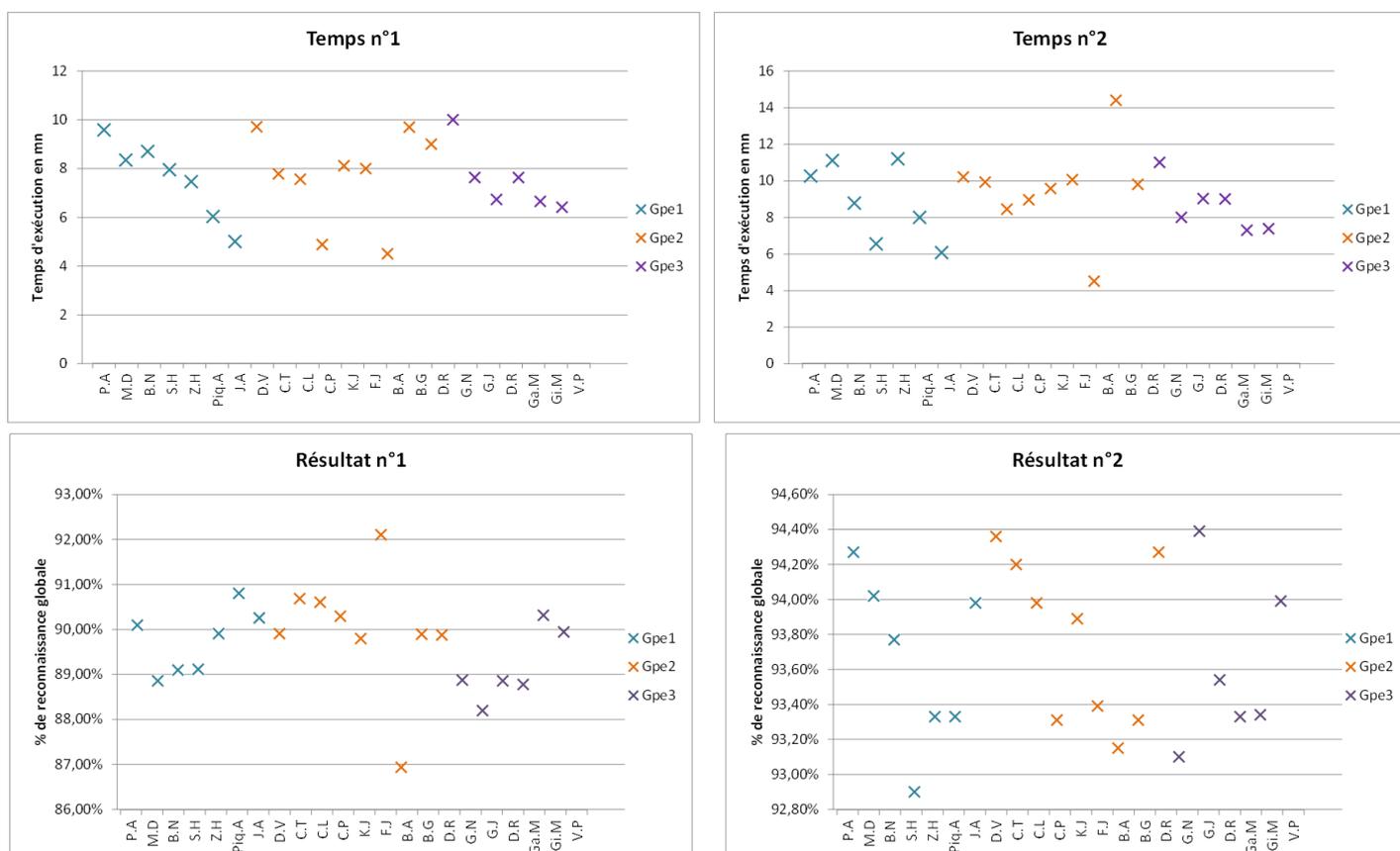


FIGURE 4.23 – Résultats obtenus par chaque testeur pour les deux plans. Les individus sont classés par groupe de compétence. Le groupe 1 est celui des personnes ayant des compétences en bâtiment, le groupe 2 est celui des compétences en informatique et le groupe 3 est le groupe témoin.

La plupart des personnes du groupe 3, sans compétence informatique ou bâtiment ont utilisé l'outil comme un jeu en essayant de répondre rapidement et de dessiner au mieux les éléments manquants sans forcément se poser de questions particulières sur le bâtiment ou sur le fonctionnement du logiciel. Certains se demandaient même au début du test si ils seraient capables de répondre correctement.

Le premier plan a permis de les mettre en confiance et ils ont par la suite étaient plus

autonomes sur le deuxième plan. Ce qui n'est pas le cas pour les personnes du groupe 1 plus attachées au domaine de l'application et qui ont cherché à comprendre pourquoi certaines erreurs étaient présentes et qui ont pris plus le temps d'analyser le plan et le bâtiment pour obtenir un modèle cohérent.

En ce qui concerne les résultats sur les taux de reconnaissance, on note peu de différences entre les groupes pour le premier plan. Pour le second plan, la différence de résultats s'explique par le traitement des éléments intérieurs et notamment la porte de la lingerie et des toilettes qui ne sont pas toujours bien prises en compte ou corrigées.

Le meilleur résultat est obtenu par une personne du groupe 3 "G.J" nous indiquant être "habituée à jouer aux Sims et à construire des maisons!", c'est donc une personne jouant régulièrement à des jeux vidéo de construction. La meilleure moyenne est obtenue par le groupe 2 mais au vu des résultats le groupe 1 ayant des compétences en bâtiment a tendance à avoir des résultats similaires au groupe 2 ayant des compétences en informatique.

Afin d'analyser plus en détails les différences entre les groupes, nous avons représenté les distributions par des boîtes à moustache des trois groupes pour les deux plans. La figure 4.24 représente les résultats obtenus pour le premier plan. Les deux premiers groupes obtiennent la même valeur de médiane, les résultats du groupe ayant des compétences en informatique sont moins dispersés mais ils ont deux outliers. Le groupe 3 a une valeur de médiane inférieure et une plus grande dispersion.

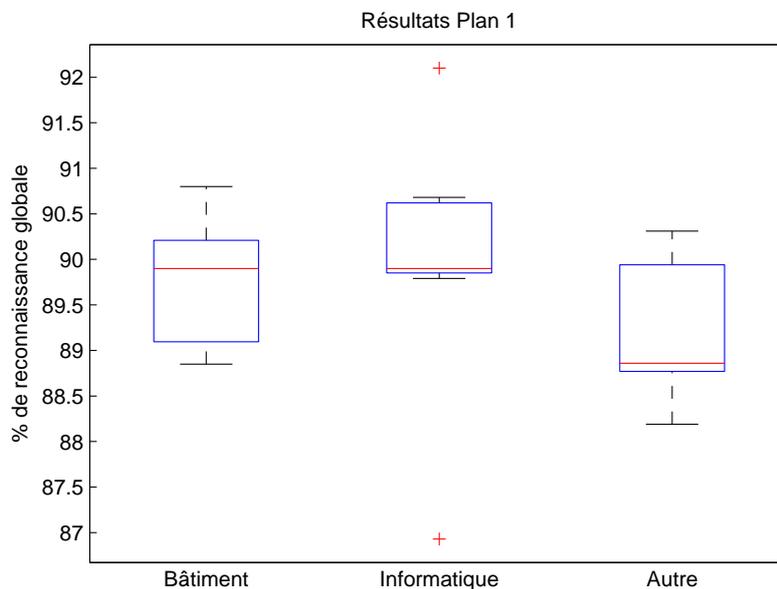


FIGURE 4.24 – Représentation à l'aide de boîtes à moustaches de la distribution statistique des taux de reconnaissance des trois groupes pour le premier plan.

Les résultats pour le deuxième plan sont présentés en figure 4.25 et ils confirment les observations faites précédemment. Le groupe 3, celui des personnes n'ayant ni compétences bâtiment ni informatique a une médiane inférieure aux deux autres groupes. Les meilleurs résultats sont obtenus pour le groupe 2 ayant des compétences informatiques bien que le groupe 1 avec des compétences bâtiments soit proche. Ces différences peuvent s'expliquer par le fait que le groupe 1 (bâtiment) est constitué d'un ensemble d'acteurs n'ayant pas les mêmes compétences sur le bâtiment (architecte, gestionnaire de patrimoine, géomètres, chercheurs).

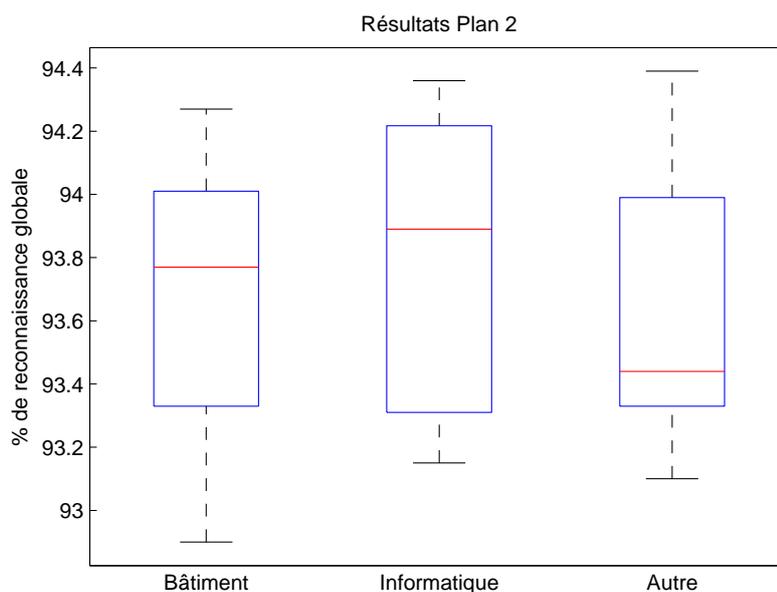


FIGURE 4.25 – Représentation à l'aide de boîtes à moustaches de la distribution statistique des taux de reconnaissance des trois groupes pour le second plan.

Ces tests utilisateurs ont été réalisés sur un échantillon restreints d'individus et il serait intéressant de les étendre à une population plus variée afin d'obtenir plus de résultats et de confirmer ou non les premières observations.

Sur les deux plans testés, le temps mis par chaque participant ne dépasse pas les 15 minutes, cela met en évidence la facilité de prise en main de l'outil et le gain de temps par rapport à une reconstruction entièrement manuelle. Pour cette taille de plan, 45 minutes au minimum sont nécessaires et l'utilisateur doit être actif tout au long du processus.

Dans les tests réalisés, l'utilisateur n'est amené à intervenir que ponctuellement. L'action qui prend le plus de temps est le dessin complémentaire. Sur les exemples proposés, 7 éléments au maximum ont été dessinés par les utilisateurs avec une moyenne de l'ordre de 4 pour le premier plan et 3 pour le deuxième. Le nombre de questions varie entre 2 et 5 pour le premier plan et entre 9 et 13 pour le deuxième plan en fonction des utilisateurs.

Bien que des disparités soient présentes entre les différents groupes, on note qu'il ne faut pas forcément avoir de compétences ni dans le domaine du bâtiment ni informatique pour réussir à obtenir des résultats corrects et des maquettes numériques cohérentes. Ces

résultats permettent de valider la méthodologie développée pour proposer des choix de corrections simples et adaptés. Le fait de montrer à l'utilisateur des images pour aider au choix des réponses a été apprécié et permet de corriger plus facilement les erreurs.

4.4 Conclusion - Discussion

L'objectif de ce chapitre est de valider la robustesse et la généralisation des méthodes présentées précédemment. Les développements réalisés pour généraliser les méthodes au traitement de plans d'origines et de qualités différentes ont été présentés et testés. De plus, des tests utilisateurs ont été menés pour valider le procédé sur un échantillon d'individus variés.

4.4.1 Validation de la robustesse et généralisation

La généralisation de l'outil à des plans d'origines différentes a permis le traitement de plans dont les murs sont représentés avec diverses textures : zone homogène de pixels noirs, de pixels blancs ou hachurée. De plus, les méthodes ont également été testées pour vérifier l'adéquation du procédé lors d'un passage à l'échelle et d'une gestion multi-niveaux pour traiter le cas de bâtiments de taille importante étant constitués de plusieurs étages.

La principale limite du passage à l'échelle est le temps nécessaire pour créer l'ensemble des murs candidats de l'image. Ce temps augmente linéairement par rapport au nombre de segments extraits.

Actuellement, l'ensemble de segments est préalablement filtré selon l'inclinaison : segments horizontaux, verticaux et obliques. Chaque couple probable pour générer un mur candidat est testé. Une solution envisagée est de tenir compte des zones de proximités (sous-groupes de segments) dans l'ensemble des segments afin de limiter la recherche de segments homologues au sous-groupe concerné. Ce traitement permettrait de diminuer le nombre de combinaisons testées et de ce fait le temps d'exécution. La taille de cette zone de proximité serait dépendante de la taille de l'image et éventuellement variable en fonction de la configuration du plan et des densités de segments dans les différentes parties de l'image.

De plus, lors des tests réalisés sur des bâtiments de grande taille, le nombre d'interactions utilisateurs augmente lui aussi fortement. La plupart des actions a pour but de nettoyer le plan, notamment la forme extérieure et les artefacts présents.

Il serait intéressant de développer un procédé pour intégrer des outils interactifs. L'utilisateur pourrait alors sélectionner via une interface, l'ensemble des murs qu'il juge ne faisant pas partie de la forme extérieure afin qu'ils ne soient plus pris en compte dans le processus. Cette action lui laisserait plus de liberté et peut augmenter le temps d'exécution. Cependant, pour des plans de grande taille cela devient intéressant car un grand nombre de sollicitations augmente aussi le risque d'erreur dans les réponses dû principalement à une certaine lassitude.

La méthode testée pour une gestion multi-niveau du bâtiment a été la mise en correspondance selon des éléments du bâtiment, a posteriori. Cette méthode a permis de

montrer qu'il est possible de recalculer deux étages entre eux mais elle mériterait une plus grande précision. Les informations concernant les liens entre murs d'étages différents n'ont pas été prises en compte dans cette méthode. C'est pourquoi il serait intéressant de développer la méthode où plusieurs étages sont reconstruits simultanément pour identifier tous les liens et corriger plus précisément les étages. Cependant, cette méthode requiert des changements dans le procédé de reconstruction et le modèle interne utilisé.

Actuellement la généralisation des méthodes développées au traitement de murs de textures diverses est limitée par le fait qu'il faille spécifier les fonctions nécessaires à la création d'une image compatible avec nos critères pour l'extraction des éléments du bâtiment.

Afin de résoudre ce problème, une solution envisagée est de mettre en place un processus d'apprentissage des symboles et des motifs en fonction des représentations rencontrées. Un tel système permettrait de prendre en compte de nouvelles textures de murs ainsi que la diversité des éléments tels que les ouvrants ou les escaliers afin de limiter la création d'éléments faux.

En effet, les escaliers génèrent dans certains cas des éléments inexistant dans la maquette numérique qui sont par la suite difficile à identifier et à supprimer. Dans le cas où les murs sont représentés par des zones homogènes de pixels noirs, les escaliers ne sont en général pas confondus avec des murs car les méthodes de validation des murs candidats sont fiables et utilisent l'image originale.

Pour les autres configurations, l'image servant à valider les murs candidats est moins précise et la présence d'un escalier génère régulièrement un ou plusieurs murs inexistant. Une méthode de détection de ces murs inexistant basée sur une recherche de murs parallèles, de même longueur, alignés et répartis uniformément entre eux a été testée pour les supprimer automatiquement. Cependant, cette méthode n'est pas suffisamment robuste pour être appliquées sur tous types de plan car elle supprime également des murs correctement identifiés. C'est pourquoi, il faut développer des méthodes de détection de symboles plus avancées.

4.4.2 Validation du procédé de reconstruction assistée

Les tests utilisateurs ont été réalisés sur un échantillon de 22 personnes réparties en trois groupes : ceux ayant des compétences en bâtiment, en informatique ou logiciel et ceux n'ayant ni compétence bâtiment ni informatique. L'objectif était de valider le procédé de questionnement et de reconstruction assistée de la maquette numérique par des utilisateurs n'ayant jamais utilisé l'outil.

Les résultats sur deux plans ont alors montré que les groupes avec des compétences informatiques ou bâtiments obtiennent des résultats similaires et légèrement supérieurs à ceux du troisième groupe. Cependant, les temps d'exécution sont eux quasiment équivalents entre les trois groupes. Ces tests ont permis de valider la pertinence du procédé développé, de la liste de corrections à apporter ainsi que des propositions faites à l'utilisateur. On peut également noter que tous les résultats obtenus sont supérieurs à ceux issus du processus de reconnaissance automatique.

A l'issue des différents tests, les échanges avec les utilisateurs ont permis d'identifier plusieurs pistes d'amélioration de l'Interface Homme Machine (IHM) pour qu'elle soit plus ergonomique et qu'elle permette une meilleure gestion des interactions avec l'utilisateur. Deux améliorations sont envisagées :

1. Adapter le module de dessin complémentaire pour qu'il soit directement en lien avec le modèle interne.
2. Permettre à l'utilisateur de modifier ponctuellement un objet lorsqu'une question est posée.

Un certain nombre de personnes ont eu des difficultés pour savoir comment dessiner correctement l'élément pour que les liens topologiques soient bien reconnus. Actuellement, l'interface de dessin est simple et ne prend pas en compte les informations topologiques. Il faut donc développer une IHM plus avancée.

La solution envisagée est de proposer une interface de dessin directement couplée au modèle interne de données sans passer par l'utilisation d'un fichier texte contenant les coordonnées des éléments dessinés. Lors du dessin, l'utilisateur pourrait directement relier l'élément dessiné avec un élément existant pour spécifier clairement la présence d'un point topologique. Cette méthode est déjà existante dans des logiciels de dessin ou de saisie de données comme par exemple les Systèmes d'Information Géographique (SIG).

La figure 4.26 présente d'une part la solution actuelle (à gauche) et d'autre part la solution proposée (à droite). L'exemple utilisé concerne la création d'une porte intérieure représentée par un rectangle rose. Dans la solution actuelle, seules les coordonnées de la porte sont envoyées au modèle interne de données. Dans la solution envisagée, une proposition de lien topologique représenté par un cercle marron est explicitement faite entre la porte et le mur représenté par un rectangle bleu.

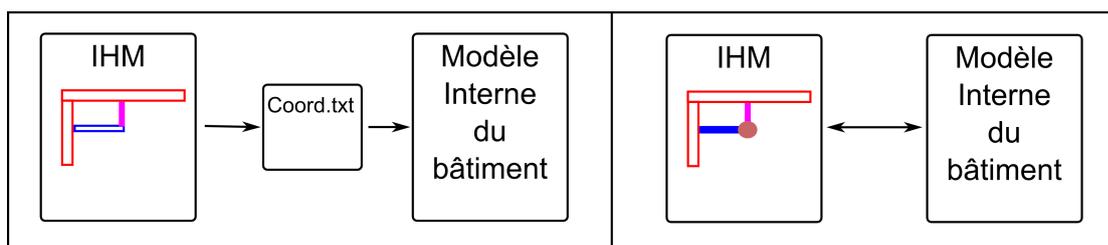


FIGURE 4.26 – Proposition d'amélioration de l'IHM de dessin pour la création d'une porte (en rose). A gauche, la solution actuelle et à droite la solution envisagée où une proposition de lien topologique (rond marron) est faite avec le mur en bleu lors du dessin de la porte.

Cependant, cette solution nécessite de reprendre entièrement l'architecture logicielle de l'interface de dessin qui a été conçue de manière simple sans lien avec le modèle de données. Il faut mettre en place une méthodologie qui permette de faire le lien entre les composants du modèle de données et le positionnement de la souris dans l'interface afin d'enrichir les informations topologiques et les interactions avec l'utilisateur.

Il faut alors créer un processus dynamique qui génère les éléments au fur et à mesure de la saisie par l'utilisateur. Avec un tel processus, le modèle de données n'est pas modifié, il suffit de créer une méthode qui prenne en entrée le type d'élément dessiné et la position

de la souris pour donner en sortie l'élément le plus proche avec lequel on peut connecter l'élément dessiné afin que son apparence soit modifiée dans l'interface et que l'utilisateur confirme ou non la liaison. Cette interface permettrait de réaliser un gain de temps par rapport à la version actuelle. En effet, le dessin est validé par l'utilisateur en temps réel.

La deuxième proposition envisagée est de permettre à l'utilisateur de modifier ponctuellement un objet lorsqu'une question est posée. Dans certains cas, il arrive qu'un mur n'ait pas exactement la bonne longueur mais qu'il soit bien positionné. Cela peut entraîner des erreurs dans la recherche d'autres éléments notamment pendant la phase de reconstruction des éléments intérieurs. Actuellement, lorsqu'un mur est trop long, la solution est de le supprimer pour le redessiner par la suite.

La figure 4.27 illustre ce cas pour le deuxième plan traité par les testeurs. La question posée porte sur un éventuel lien entre le mur représenté en orange et celui en noir. Ce dernier n'a pas une dimension correcte, il est trop long à droite et à gauche. La solution actuelle est donc de le supprimer et de le redessiner lors de la phase de dessin complémentaire.

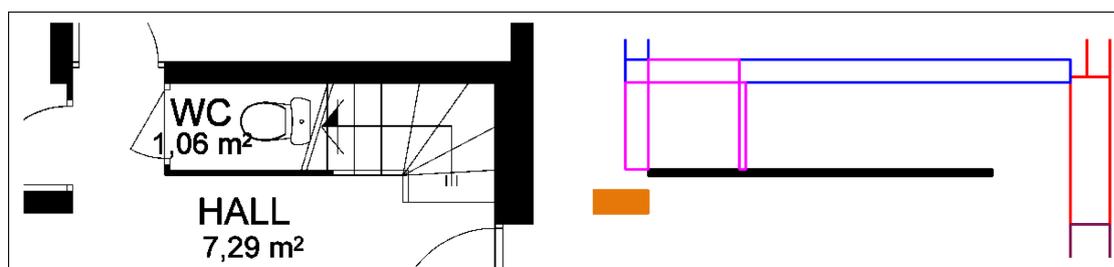


FIGURE 4.27 – Exemple où le mur noir de l'image de droite pourrait être directement modifié par l'utilisateur plutôt que d'être supprimé pour être dessiné ensuite correctement.

La solution envisagée est d'autoriser ponctuellement l'utilisateur à redéfinir la longueur de certains murs en modifiant directement le rectangle représentant le mur en question. Cette solution permettrait un gain de temps et une diminution des actions de l'utilisateur car il n'aurait pas besoin de supprimer un mur pour le redessiner ensuite.

Pour réaliser une telle action, il faut tout d'abord ajouter une option à l'utilisateur pour qu'il puisse directement modifier le mur en question dans l'IHM de dessin sans entraîner de changements sur les autres éléments du bâtiment. Cette action doit également rester ponctuelle, pour cela nous proposons qu'elle ne soit possible que lors de la reconstruction des éléments intérieurs et n'être applicable que pour des murs intérieurs.

Conclusion

Afin de répondre aux nouvelles normes énergétiques, de plus en plus de bâtiments existants seront rénovés partiellement ou totalement dans les années à venir. De nombreux outils logiciels permettent actuellement d'assister la planification et la réalisation des travaux de rénovation, en vue d'une plus grande efficacité énergétique.

Pour réaliser des simulations thermiques, la maquette numérique 3D est un outil majeur pour l'aide à la décision et la réalisation de simulation thermique. Cependant, il est rare de pouvoir disposer d'une maquette numérique 3D en rénovation, puisque la très grande majorité des bâtiments existants ont été conçus à l'aide d'approches traditionnelles (esquisses, plans papiers 2D). Une solution serait de construire les maquettes numériques des bâtiments existants, mais créer manuellement une maquette numérique 3D est une tâche longue et coûteuse. C'est pourquoi il est indispensable de simplifier le processus de génération de maquettes numériques 3D.

L'objectif des travaux présentés ici est de définir une méthodologie pour générer des maquettes numériques 3D à partir des données disponibles de bâtiments existants en un temps et un coût raisonnables. A partir d'une étude bibliographique de l'ensemble des méthodes existantes, l'approche choisie consiste à coupler une extraction automatique du modèle 3D de plans 2D scannés avec des interventions ponctuelles et guidées de l'utilisateur.

La méthodologie développée traite toutes les étapes de la reconstruction depuis l'extraction des caractéristiques primitives dans l'image jusqu'à l'export 3D de la maquette numérique. Pour cela, des méthodes issues des domaines de traitement d'image, de la reconnaissance de document numérique, du génie logiciel et du BIM ont été utilisées et combinées.

Le procédé développé a permis d'aboutir à une reconstruction automatique de maquettes en se basant sur un plan 2D papier par une approche hiérarchique, en assemblant de manière itérative les éléments extraits par les algorithmes de reconnaissance de forme. La maquette est définie selon un ensemble de règles focalisées selon les 3 composantes : géométrie, topologie et sémantique. Cependant, bien que générique, cette approche est limitée par la grande variété de représentations architecturales existantes. C'est pourquoi, il est nécessaire d'améliorer le procédé, ici grâce à des interventions utilisateur ponctuelles et guidées.

Dans notre approche, l'utilisateur est sollicité ponctuellement pour corriger les erreurs relevées grâce à un ensemble de propositions générées automatiquement en fonction de

l'erreur traitée et de la configuration du plan. Cette approche permet également de reconstruire une maquette numérique d'un bâtiment existant en un temps et un nombre d'actions limités. Par rapport à d'autres méthodes de reconstruction, aucune acquisition de données sur site n'est nécessaire, le coût de création de la maquette numérique est donc faible.

A. Résumé des travaux

Reconstruction automatique de maquettes numériques

L'étude bibliographique a mis en évidence le fait que beaucoup de solutions proposées ne traitent pas systématiquement toutes les étapes de la conversion du plan 2D vers la maquette 3D :

1. Extraction des primitives géométriques et du texte.
2. Reconnaissance des éléments du bâtiment.
3. Reconstruction de la maquette numérique.
4. Validation et correction.
5. Export vers un format compatible avec le BIM.

C'est pourquoi, la méthodologie développée prend en compte toutes les étapes décrites ci-dessus pour convertir automatiquement une image de plan en une maquette numérique 3D du bâtiment associé. Le processus débute par une phase d'extraction, à partir de l'image, de primitives géométriques (segments, arcs). Vient ensuite une phase de reconnaissance d'éléments caractéristiques (murs, ouvrants, pièces) à partir des primitives géométriques. Cette reconstruction est réalisée grâce à un ensemble de règles logiques se basant sur l'analyse des trois composantes suivantes : la géométrie, la topologie et la sémantique.

L'approche de reconstruction est dite ascendante car elle part de l'élément le plus fin que l'on peut trouver dans une image : le pixel pour les assembler afin d'identifier les éléments spécifiques du bâtiment qui sont ensuite agencés pour créer une maquette numérique. Une fois la maquette numérique générée, elle peut alors être importée dans des logiciels compatibles avec le BIM.

Un modèle de donnée interne : *l'IfcLight* a également été conçu, constitué d'un sous-ensemble de l'IFC et a l'avantage de s'affranchir de certaines contraintes imposées par l'IFC tout en assurant une conformité avec ce dernier.

Une évaluation des performances a été réalisée sur une base de données de 90 images de plans architecturaux. Grâce à la création d'une base vérité terrain de la précision des pixels pour chaque image, une évaluation a pu être réalisée. Les résultats sont prometteurs bien que les éléments intérieurs soient généralement moins bien reconnus que ceux extérieurs car le processus est focalisé en priorité sur la forme extérieure.

Cependant, il arrive que des erreurs et des incohérences soient générées dans la maquette numérique produite. Ces erreurs ne peuvent pas toujours être corrigées automatiquement en raison d'un manque d'information sur le plan ou de spécificités liées à la

configuration du plan. L'orientation choisie est de solliciter une intervention humaine plutôt que de rajouter de la complexité au processus.

C'est pourquoi, nous avons proposé d'étendre l'approche en incluant l'utilisateur. L'idée principale étant de le solliciter ponctuellement et de le guider dans les corrections en posant des questions précises pour qu'il ait le moins d'actions à réaliser et que cela ne soit pas coûteux en temps.

Reconstruction semi-automatique de maquettes numériques

Une analyse des erreurs générées lors du processus automatique de création de maquettes numériques 3D a été réalisée afin d'identifier pour chaque erreur sa cause et son impact lors de la reconstruction. Une taxonomie des erreurs a été proposée, basée sur les trois composantes suivantes : géométrie, topologie et sémantique. Pour chaque erreur, sa criticité a été calculée, basée notamment sur l'impact de l'erreur selon les applications futures envisagées (exemple : simulation énergétique).

Grâce à cette classification, un processus de détection automatique des erreurs a été mis en place. Elles sont identifiées au fur et à mesure du processus et sont classées en fonction de leur score de criticité. Un système de correction a également été développé pour intervenir à différentes étapes de la reconstruction : à la fin de la phase de reconstruction de la forme extérieure du bâtiment puis après celle de reconstruction des éléments intérieurs.

Pour chaque erreur enregistrée, des choix de corrections sont proposés à l'utilisateur. Une image représentant les changements du choix sur la maquette numérique est automatiquement générée pour chaque proposition. Ces choix ont été définis grâce à l'analyse des erreurs et de leur cause, ils sont ensuite adaptés en fonction de la configuration du plan et des propriétés des éléments impliqués. Cependant, dans certains cas, les choix proposés ne permettent pas de corriger l'ensemble des erreurs.

La robustesse du processus développé a été testée en utilisant la même base de plans que lors des tests du processus automatique. La reconstruction semi-automatique améliore les performances de reconnaissance automatique en conservant des temps d'exécution raisonnables. Grâce à la reconstruction semi-automatique, quasiment tous les éléments du bâtiment sont reconnus et bien définis et peu d'éléments inexistantes sont également générés.

Cette approche permet de conserver le gain de temps acquis lors de la reconstruction automatique par rapport à une reconstruction entièrement manuelle. En effet, pour chaque proposition, une image illustrant l'impact du choix sur la maquette numérique est créée automatiquement afin que l'utilisateur puisse choisir l'option la plus adaptée.

L'originalité de ces travaux est de réaliser une reconstruction semi-automatique guidée dans laquelle l'utilisateur n'intervient que ponctuellement avec des questions et des choix adaptés à chaque situation. Il n'est pas nécessaire d'avoir a priori de connaissances dans le domaine du bâtiment pour y répondre et réussir à générer une maquette numérique du bâtiment complète et cohérente.

Validation de la robustesse et généralisation

Une problématique liée à l'identification d'éléments caractéristiques d'un bâtiment sur une image est la multiplication des représentations graphiques utilisées. En effet, suivant les plans, les textures et les symboles utilisés pour représenter les éléments ne sont pas forcément les mêmes.

C'est pourquoi, les tests ont été étendus pour évaluer la robustesse du processus pour des plans d'origines et de sources différentes. La gestion des bâtiments de grande taille comportant plusieurs étages a elle aussi été évaluée.

Pour cela, des méthodes complémentaires ont été développées pour adapter le procédé lors de la phase de prétraitement et d'extraction des caractéristiques. Les différents tests réalisés ont montré l'efficacité de cette nouvelle approche qui accroît encore la qualité des maquettes générées. Le temps d'exécution est dépendant de la taille du bâtiment mais reste toujours nettement inférieur à une reconstruction entièrement manuelle même pour des bâtiments de grande taille.

Afin de valider la pertinence de la classification des erreurs et des propositions faites, des tests utilisateurs ont également été menés. Chaque personne a dû traiter deux plans représentatifs de la base d'images. Ces tests ont mis en évidence la pertinence du processus de questions posées à l'utilisateur. Les temps d'exécution sont toujours raisonnables et les résultats obtenus lors de l'évaluation des taux de reconnaissance sont eux aussi concluants.

Cependant, la maquette numérique n'est à ce stade là pas assez complète pour permettre une simulation énergétique dans un logiciel dédié. Des éléments non disponibles sur le plan 2D et donc sur la maquette numérique sont manquants comme par exemple la composition des murs et des ouvrants ou encore les hauteurs et positionnements relatifs des fenêtres dans les murs. La partie suivante présente les limitations du processus développé et propose des pistes d'amélioration.

B. Limites du processus développé

Les différents tests réalisés ont révélé certaines limitations du processus développé. Tout d'abord, le manque d'information sur le plan 2D entraîne la génération de maquettes en partie incomplètes, notamment dans la définition de la troisième dimension.

Aucune information concernant la hauteur des murs, des ouvrants ainsi que leur positionnement relatif dans leur mur de référence n'est disponible sur le plan 2D. Ces valeurs sont actuellement des paramètres définis empiriquement pouvant être modifiés par l'utilisateur si nécessaire. De plus, les matériaux utilisés lors de la construction du bâtiment ne sont pas non plus renseignés car c'est également une information non disponible sur le plan 2D.

D'autres informations restent difficiles à traiter, c'est le cas par exemple des représentations d'escalier. sont également manquantes dans le plan telles que la description d'un escalier. Ces derniers sont généralement représentés par des traits indiquant des marches mais cette information n'est pas suffisante pour en assurer la reconstruction. En effet, il faut spécifier un certain nombre de paramètres tels que le nombre de marches, la hauteur

entre chacune ou encore le positionnement de la rampe. De même, le toit n'est pas non plus modélisé, même s'il est parfois partiellement représenté sur le plan initial.

Des éléments inexistantes sont parfois créés dans les maquettes numériques tels que des murs ou des ouvrants. Il est difficile de les identifier automatiquement sans une implication conséquente de l'utilisateur pour qu'il vérifie visuellement l'ensemble des éléments générés. Leur création est spécifique au plan et aux éléments déjà identifiés. Par exemple, des portes intérieures inexistantes peuvent être générées dans des zones où beaucoup de portes sont représentées. Des artefacts peuvent également être générés, en raison de la présence d'éléments graphiques non liés au bâtiment.

Les vérifications mises en place permettent de supprimer une partie des éléments inexistantes mais il faudrait développer des méthodes spécifiques pour les identifier plus finement lors des phases de validation et de correction.

Le traitement des plans de grande taille induit une augmentation importante du nombre de questions générées et des interventions utilisateurs en raison notamment d'artefacts présents lors de l'identification des murs candidats. Le processus permet de sélectionner les erreurs à corriger en priorité mais il serait intéressant de mieux guider l'utilisateur en réalisant une hiérarchisation des choix proposés pour que celui avec la plus forte probabilité soit présenté en premier. Pour cela, un apprentissage des réponses pourrait être réalisé.

La méthodologie de reconstruction des pièces du bâtiment, une fois la reconstruction de la forme extérieure et des éléments intérieurs terminée, permet d'identifier des pièces avec des géométries simples : forme rectangulaire ou polygonale. Les pièces plus grandes avec une géométrie complexe ne sont pas identifiées. Ainsi, tous les espaces ne sont pas reconnus dans la maquette alors que ces informations sont requises pour réaliser des simulations énergétiques.

Les maquettes numériques ne contiennent actuellement pas suffisamment d'information pour être directement importées dans des logiciels de simulation énergétique. C'est pourquoi, nous proposons des pistes d'amélioration pour enrichir la maquette numérique.

C. Perspectives

Enrichir la maquette numérique

Une perspective est d'intégrer des données complémentaires au processus actuel. Cette piste a été évoquée dans le chapitre 1. Elle n'a en revanche pas pu être testée sur des données réelles dans le cadre de ces travaux. Les maquettes générées sont actuellement exploitables dans des logiciels compatibles avec le BIM mais incomplètes pour des simulations énergétiques. Ces informations ne sont en général pas présentes dans le plan, c'est pourquoi l'ajout de données complémentaires fait partie d'une des perspectives les plus importantes pour la suite.

La méthodologie mise en place a été conçue afin de permettre une intégration facile

de nouvelles données. Nous présentons dans cette partie les modifications à apporter pour intégrer des données de segmentation d’images de façade et de relevés de données sur site. Cependant, ces relevés doivent être ponctuels et définis avant la visite pour que cela ne prenne pas trop de temps supplémentaire. Les informations manquantes sont principalement tout ce qui concerne la troisième dimension et le type de matériaux utilisés lors de la construction du bâtiment.

Nous proposons d’utiliser les résultats de segmentation d’images de façade pour récupérer les informations suivantes :

- Dimension verticale des ouvrants extérieurs (portes et fenêtres).
- Dimension verticale des murs extérieurs ainsi que la hauteur des étages.
- Positionnement relatif des ouvrants par rapport aux murs.

De nombreux travaux ont été réalisés, en particulier au CSTB (Centre Supérieur et Technique du Bâtiment) pour segmenter une image de façade. Les données d’entrée sont un ensemble de photos de la façade. Ces informations pourront ensuite être transmises et intégrées à la maquette numérique.

La segmentation d’images de façade permet d’obtenir un ensemble d’informations précises sur la structure du bâtiment mais il est plus difficile d’estimer la composition des éléments du bâtiment. Pour cela, il est possible de s’aider d’une base de référence contenant les matériaux généralement utilisés lors de la construction. Cette base de référence serait régulièrement mise à jour en fonction des bâtiments traités. Ces informations d’ordre sémantique sont indispensables pour la réalisation du diagnostic énergétique du bâtiment.

L’enrichissement de la maquette numérique permet de mieux décrire l’information géométrique des éléments, par l’ajout d’informations complémentaires sur la troisième dimension. La composante sémantique est elle aussi précisée grâce notamment à la composition des matériaux qui est une information importante avant la réalisation de travaux de rénovation.

Améliorer le processus développé

Une piste d’amélioration concernant le processus actuel est de le rendre plus robuste afin de traiter un ensemble encore plus varié de symboles et de formes. Actuellement, le mobilier n’est pas identifié dans l’image alors qu’il est une source d’information sémantique. Le principe est de rajouter au moment de l’identification des murs candidats, une méthode de détection du mobilier. Cela permettrait également d’améliorer les performances d’extraction d’éléments.

Afin de diminuer le nombre de questions posées à l’utilisateur, une piste envisagée est d’utiliser des méthodes d’apprentissage. L’idée est d’enregistrer, pour chaque plan traité, les erreurs générées et les actions faites par l’utilisateur pour pouvoir dans le cas où la même situation se produit, corriger automatiquement l’erreur sans faire intervenir l’utilisateur.

Cette méthode permettrait au processus d’enregistrer un certain nombre de situations et de configurations pouvant se produire et de rechercher des similarités entre l’erreur,

l'action requise et le plan original. Cependant, un tel système nécessite d'être dynamique et enrichi à chaque nouveau plan traité. De plus, les normes en vigueur et les textes de réglementation du domaine de la construction pourraient être utilisés lors de la vérification de la maquette numérique.

Un axe de recherche qui n'a pas été abordé dans ces travaux concerne l'aspect collaboratif du BIM. C'est une de ses caractéristiques principales car le BIM a pour vocation de réunir l'ensemble des acteurs du bâtiment autour d'une unique maquette numérique afin de limiter les problèmes d'échange de données et de mise à jour des différents modèles utilisés lors d'un projet commun. Cette notion pourrait être utilisée lors de la phase d'enrichissement de la maquette numérique.

En effet, chaque acteur du bâtiment peut compléter la maquette numérique produite en fonction de ses compétences techniques, de sa connaissance du bâtiment et des informations dont il a besoin. Cela permettrait de tirer profit de la spécificité de chaque métier du bâtiment afin de générer des maquettes numériques complètes et cohérentes.

Ces ajouts et corrections seraient ensuite enregistrés et analysés afin de pouvoir être automatiquement appliqués sur d'autres bâtiments avec des configurations similaires grâce à de l'apprentissage de données. Un tel système permettrait aussi un gain de temps car l'information nécessaire est directement renseignée par les personnes compétentes dans le domaine et cela évite des acquisitions supplémentaires de données ainsi que des visites sur site. Cela permettrait d'enrichir notamment la base de référence des symboles afin de mieux prendre en compte la variété de représentations dans les plans architecturaux.

Finalement, les travaux présentés permettent de générer une maquette numérique 3D du bâtiment avec une structure cohérente (description fine de la géométrie et de la topologie) et des informations sémantiques mais de nombreuses opportunités de recherche se présentent pour enrichir encore plus la maquette numérique.

Bibliographie

- [1] Charles EASTMAN, David FISHER, Gilles LAFUE, Joseph LIVIDINI, Douglas STOCKER et Christos YESSIOS : An outline of the Building Description System. Rapport technique, Institute of Physical Planning, 1974.
- [2] Ireneusz CZMOCH et Adam PEKALA : Traditional Design versus BIM Based Design. *Procedia Engineering*, 91:210 – 215, 2014. XXIII R-S-P Seminar, Theoretical Foundation of Civil Engineering (23RSP) (TFoCE 2014).
- [3] Bodgan ATANASIU, Chantal DESPRET, Marina ECONOMIDOU, Joana MAIO, Ingeborg NOLTE et Oliver RAPF : *Europe's buildings under the microscope-A country-by-country review of the energy performance of buildings*. Buildings Performance Institute Europe (BPIE), October 2011.
- [4] Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie. *Bâtiment, chiffres clés*, 2013.
- [5] Luis PÉREZ-LOMBARD, José ORTIZ et Christine POUT : A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 40(3):394 – 398, 2008.
- [6] Yi-Kai JUAN, Peng GAO et Jie WANG : A hybrid decision support system for sustainable office building renovation and energy performance improvement. *Energy and Buildings*, 42(3):290 – 297, 2010.
- [7] Robina HETHERINGTON, Robin LANEY, Stephen PEAKE et David OLDHAM : Integrated building design, information and simulation modelling : the need for a new hierarchy. In *Building Simulation 2011*, Sydney, Australie, 14-16 Novembre 2011.
- [8] Sylvain ROBERT, Davide MAZZA, Bruno HILAIRE et Benoit VINOT : An approach to enhancing the connection between BIM models and building energy simulation – HVAC systems in the loop. In *ECPPM 2014, eWork and eBusiness in Architecture Engineering and Construction*, pages 149–154, September 2014.
- [9] Mc Graw Hill CONSTRUCTION : The Business Value of BIM for Construction in Major Global Markets. 2014.
- [10] Olivier CELNIK et Eric LEBÈGUE : *BIM et maquette numérique pour l'architecture, le bâtiment et la construction*, chapitre Petit tour d'horizon-La carte du BIM par Bernard Ferriès, pages 65–67. Eyrolles, CSTB, 2014.
- [11] Darius MIGILINSKAS, Vladimir POPOV, Virgaudas JUOCEVICIUS et Leonas USTINOVICHUS : The Benefits, Obstacles and Problems of Practical Bim Implementation. *Procedia Engineering*, 57:767 – 774, 2013. Modern Building Materials, Structures and Techniques.
- [12] Fernando G. Bañuelos BLANCO et Haibo CHEN : The Implementation of Building Information Modelling in the United Kingdom by the Transport Industry. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 138:510 – 520, 2014. The 9th International Conference on Traffic and Transportation Studies (ICTTS 2014).

- [13] Salman AZHAR, Malik KHALFAN et Tayyab MAQSOOD : Building Information Modelling (BIM) : now and beyond. *Australasian Journal of Construction Economics and Building*, 12(4):15–28, 2012.
- [14] Olivier CELNIK et Eric LEBÈGUE : *BIM et maquette numérique pour l'architecture, le bâtiment et la construction*, chapitre Petit tour d'horizon-Etat de l'art en France par Garrick Pierrefeu, pages 63–64. Eyrolles, CSTB, 2014.
- [15] Peter SMITH : BIM implementation - global strategies. *Procedia Engineering*, 85:482 – 492, 2014. Selected papers from Creative Construction Conference 2014.
- [16] David BRYDE, Martí BROQUETAS et Jürgen Marc VOLM : The project benefits of Building Information Modelling (BIM). *International Journal of Project Management*, 31(7):971 – 980, 2013.
- [17] Mohamed EL-MEKAWY, Anders OSTMAN et Ihab HIJAZI : An Evaluation of IFC-CityGML Unidirectional Conversion. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 3(5):159–171, 2012.
- [18] Y.-S JEONG, C.M EASTMAN, R. SACKS et I. KANER : Benchmark tests for BIM data exchanges of precast concrete. *Automation in Construction*, 18:469–484, 2009.
- [19] Jim STEEL, Robin DROGEMULLER et Bianca TOTH : Model interoperability in building information modelling. *Software and Systems Modeling*, 11:99–109, 2012.
- [20] John SCHRAYEN, Vincent DELFOSSE, Roland JUCHMES et Pierre LECLERCQ : Evaluation des échanges au format IFC dans le cadre de la réglementation thermique. *In Complexité(s) des modèles de l'architecture numérique : Actes du 5ème séminaire de Conception Architecturale Numérique (SCAN'12)*, Paris, France, 2012.
- [21] Gerhard GRÖGER et Lutz PLÜMER : CityGML-Interoperable semantic 3D city models. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 71:12–33, 2012.
- [22] Olivier CELNIK et Eric LEBÈGUE : *BIM et maquette numérique pour l'architecture, le bâtiment et la construction*, chapitre Le standard CityGML, pages 248–256. Eyrolles, CSTB, 2014.
- [23] Javier IRIZARRY, Ebrahim P. KARAN et Farzad JALAEI : Integrating BIM and GIS to improve the visual monitoring of construction supply chain management. *Automation in Construction*, 31:241 – 254, 2013.
- [24] Norbert HAALA et Martin KADA : An update on automatic 3D building reconstruction. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65:570–580, 2010.
- [25] Rebekka VOLK, Julian STENGEL et Frank SCHULTMANN : Building Information Modeling (BIM) for existing buildings - Literature review and future needs. *Automation in Construction*, 38:109 – 127, 2014.
- [26] Frederik TACK, Gurcan BUYUKSALIH et Rudi GOOSENS : 3D building reconstruction based on given ground plan information and surface models extracted from spaceborne imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 67:52–64, 2012.
- [27] Mathieu BRÉDIF, Olivier TOURNAIRE, Bruno VALLET et Nicolas CHAMPION : Extracting polygonal building footprints from digital surface models : A fully-automatic global optimization framework. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 77:57–65, 2013.
- [28] Florent LAFARGE, Xavier DESCOMBES, Josiane ZERUBIA et Marc PIERROT-DESEILLIGNY : Automatic building extraction from DEMs using an object approach

- and application to the 3D-city modeling. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 63:365–381, 2008.
- [29] Dong-Min WOO et Dong-Chul PARK : Stereoscopic Modeling of Building Rooftop from IKONOS Satellite Image Data. *In Information Science and Applications (ICISA), 2011 International Conference on*, pages 1–5, Avril 2011.
- [30] Jean-Pascal BUROCHIN, Bruno VALLET, Mathieu BRÉDIF, Clément MALLET, Thomas BROSSET et Nicolas PAPANODITIS : Detecting blind building façades from highly overlapping wide angle aerial imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 96:193 – 209, 2014.
- [31] Jing LI, Wei HUANG, Ling SHAO et Nigel ALLINSON : Building Recognition in Urban Environments : A survey of State-of-the-Art and Future Challenges. *Information Sciences*, 277:406 – 420, 2014.
- [32] Konrad SCHINDLER et Joachim BAUER : A Model-Based Method For Building Reconstruction. *In Higher-Level Knowledge in 3D Modeling and Motion Analysis, 2003. HLK 2003. First IEEE International Workshop on*, pages 74–82, Oct 2003.
- [33] Fabio REMONDINO et Sabry EL-HAKIM : Image-based 3D Modelling : A Review. *The Photogrammetric Record*, 21(115):269–291, 2006.
- [34] Kyung HO JANG et Soon KI JUNG : Practical modeling technique for large-scale 3D building models from ground images. *Pattern Recognition Letters*, 30:891–869, 2009.
- [35] David OK, Mateusz KOZINSKI, Renaud MARLET et Nikos PARAGIOS : High-Level Bottom-Up Cues for Top-Down Parsing of Facade Images. *In Second Joint 3DIM/3DPVT Conference : 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization et Transmission*, pages 128–135, 2012.
- [36] Jeffrey A. DELMERICO, Philip DAVID et Jason J. CORSO : Building facade detection, segmentation, and parameter estimation for mobile robot stereo vision. *Image and Vision Computing*, 31(11):841 – 852, 2013.
- [37] FAYEZ TARSHA KURDI : *Extraction et reconstruction de bâtiments en 3D à partir de relevés lidar aéroportés*. Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur Strasbourg I, 2008.
- [38] Andreas NÜCHTER et Joachim HERTZBERG : Towards semantic maps for mobile robots. *Robotics and Autonomous Systems*, 56:915–926, 2008.
- [39] Yucong DUAN, Christophe CRUZ et Christophe NICOLLE : Architectural reconstruction of 3D building objects through semantic knowledge management. *In Software Engineering Artificial Intelligence Networking and Parallel/Distributed Computing (SNPD), 2010 11th ACIS International Conference on*, pages 261–266, 2010.
- [40] Pingbo TANG, Daniel HUBER, Burcu AKINCI, Robert LIPMAN et Alan LYTLE : Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds : A review of related techniques. *Automation in Construction*, 19:829–843, 2010.
- [41] Xuehan XIONG, Antonio ADAN, Burcu AKINCI et Daniel HUBER : Automatic creation of semantically rich 3d building models from laser scanner data. *Automation in Construction*, 31:325 – 337, 2013.
- [42] Daniel HUBER, Burcu AKINCI, Antonio ADAN, Engin ANIL, Brian OKORN et Xuehan XIONG : Methods for Automatically Modeling and Representing As-built

- Building Information Models. *In In Proceedings of the NSF CMMI Research Innovation Conference*, Atlanta, GA, USA, Janvier 2011.
- [43] Andrey DIMITROV et Mani GOLPARVAR-FARD : Vision-based material recognition for automated monitoring of construction progress and generating building information modeling from unordered site image collections. *Advanced Engineering Informatics*, 28(1):37 – 49, 2014.
- [44] Andrey DIMITROV et Mani GOLPARVAR-FARD : Segmentation of building point cloud models including detailed architectural/structural features and MEP systems. *Automation in Construction*, 51:32 – 45, 2015.
- [45] Bisheng YANG, Zhen DONG, Gang ZHAO et Wenxia DAI : Hierarchical extraction of urban objects from mobile laser scanning data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 99:45 – 57, 2015.
- [46] Claudio MURA, Oliver MATTAUSCH, Alberto Jaspe VILLANUEVA, Enrico GOBETTI et Renato PAJAROLA : Automatic room detection and reconstruction in cluttered indoor environments with complex room layouts. *Computers & Graphics*, 44:20 – 32, 2014.
- [47] Martin WEINMANN, Boris JUTZI, Stefan HINZ et Clément MALLET : Semantic point cloud interpretation based on optimal neighborhoods, relevant features and efficient classifiers. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 105:286 – 304, 2015.
- [48] Shutao LI, Jörg ISELE et Georg BRETTHAUER : Proposed Methodology for Generation of Building Information Model with Laserscanning. *Tsinghua Science and Technology*, 13(S1):138–144, Oct 2008.
- [49] Hyojoo SON, Changmin KIM et Changwan KIM : Automated Color Model-Based Concrete Detection in Construction-Site Images by Using Machine Learning Algorithms. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 26(3):421–433, 2012.
- [50] Conor DORE et Maurice MURPHY : Semi-automatic generation of as-built BIM façade geometry from laser and image data. *In Journal of Information Technology in Construction* [50], pages 20–46.
- [51] Stéphane SAFIN, Pierre LECLERCQ et Adélaïde BLAVIER : Errors in architectural design process : towards a cognitive model. *In International Design Conference-Design 2008*, Dubrovnik-Croatie, 2008.
- [52] Stéphane SAFIN, Roland JUCHMES et Pierre LECLERC : Du crayon au stylo numérique : influences des IHM à style et des interprétations numériques sur l’activité graphique en tâches de conception. *Journal d’Interaction Personne-Système*, 2(1), Janvier 2011.
- [53] Akio SHIO et Yasuhiro AOKI : Sketch Plan : A Prototype System for Interpreting Hand-Sketched Floor Plans. *Systems and Computers in Japan*, 31(6):10–18, 2000.
- [54] Mathieu PÉCOT, Sébastien MACÉ et Eric ANQUETIL : Interprétation interactive de plans d’architecture composés à main levée. *In CIFED 2010*, 2010.
- [55] Jean-Noël DEMARET et Pierre LECLERCQ : Génération automatique d’un modèle de bâtiment à partir d’un croquis. *In Complexité(s) des modèles de l’architecture numérique : Actes du 5ème séminaire de Conception Architecturale Numérique (SCAN’12)*, 2012.

- [56] Roland JUCHMES, Pierre LECLERCQ et Sleiman AZAR : A freehand-sketch environment for architectural design supported by a multi-agent system. *Computers and Graphics*, 29:905–915, 2005.
- [57] Sleiman AZAR, Laurent COUVREUR, Vincent DELFOSSE, Benoit JASPART et Christelle BOULANGER : An Agent-Based Multimodal Interface for Sketch Interpretation. *In Multimedia Signal Processing, 2006 IEEE 8th Workshop on*, pages 488–492, 2006.
- [58] Daniel G. FERNANDEZ-PACHECO, Francisco ALBERT, Nuria ALEIXOS et Julian CONESA : A new paradigm based on agents applied to free-hand sketch recognition. *Expert Systems with Applications*, 39:7181–7195, 2012.
- [59] Rick LEWIS et Carlo SEQUIN : Generation of 3D building models from 2D architectural plans. *Computer-Aided Design*, 30(10):765–779, 1998.
- [60] H.C HUANG, S.M LO, G.S ZHI et R.K.K YUEN : Graph theory-based approach for automatic recognition of CAD data. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 21:1073–1079, 2008.
- [61] Bernardino DOMINGUEZ, Angel-Luis GARCIA et Francisco R. FEITO : Semiautomatic detection of floor topology from CAD architectural drawings. *Computer-Aided Design*, 44:367–378, 2012.
- [62] Xuejin CHEN, Sing BING KANG, Ying-Qing XU, Julie DORSEY et Heung-Yeung SHUM : Sketching Reality : Realistic Interpretation of Architectural Designs. *ACM Transactions on Graphics*, 27(2), Avril 2008.
- [63] Sébastien MACÉ, Hervé LOCTEAU, Ernest VALVENY et Salvatore TABBONE : A System to Detect Rooms in Architectural Floor Plan Images. *In DAS '10 Proceedings of the 9th IAPR International Workshop on Document Analysis Systems*, pages 167–174, 2010.
- [64] Sheraz AHMED, Marcus LIWICKI, Markus WEBER et Andreas DENGEL : Improved Automatic Analysis of Architectural Floor Plans. *In International Conference on Document Analysis and Recognition*, pages 864–869, 2011.
- [65] Lluís-Pere de las HERAS, Sheraz AHMED, Marcus LIWICKI, Ernest VALVENY et Gemma SANCHEZ : Statistical segmentation and structural recognition for floor plan interpretation. *International Journal on Document Analysis and Recognition (IJDAR)*, pages 1–17, 2013.
- [66] Liping YANG et Michael WORBOYS : A navigation ontology for Outdoor-Indoor Space. *In Third ACM SIGSPATIAL International Workshop on Indoor Spatial Awareness (ISA 2011)*, Chicago, IL, Novembre 2011.
- [67] Michael WORBOYS : Modeling indoor space. *In Third ACM SIGSPATIAL International Workshop on Indoor Spatial Awareness (ISA 2011)*, Chicago, IL, Novembre 2011.
- [68] Hyojoo SON, Changmin KIM et Changwan KIM : 3D reconstruction of as-built industrial instrumentation models from laser-scan data and a 3D CAD database based on prior knowledge. *Automation in Construction*, 49, Part B:193 – 200, 2015. 30th ISARC Special Issue.
- [69] Susana LAGÜELA, Lucia DÍAZ-VILARIÑO, Joaquin MARTÍNEZ et Julia ARMESTO : Automatic thermographic and RGB texture of as-built BIM for energy rehabilitation purposes. *Automation in Construction*, 31:230 – 240, 2013.

- [70] Alexander KOUTAMANIS et Vicky MITOSI : Automated Recognition of Architectural Drawings. *In Pattern Recognition, 1992. Vol.I. Conference A : Computer Vision and Applications, Proceedings., 11th IAPR International Conference on*, pages 660–663.
- [71] Xuetao YIN, Peter WONKA et Anshuman RASDAN : Generating 3D Building Models from Architectural Drawings : A Survey. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 29:20–30, 2009.
- [72] Philippe DOSCH, Karl TOMBRE, Christian AH-SOON et Gérald MASINI : A complete system for the analysis of architectural drawings. *International Journal on Document Analysis and Recognition*, pages 102–116, 2000.
- [73] Achraf GHORBEL : *Interprétation interactive de documents structurés : application à la rétroconversion de plans d'architecture manuscrits*. Thèse de doctorat, Université Européenne de Bretagne, 2012.
- [74] Keechul JUNG, Kwang IN KIM et Anil K. JAIN : Text information extraction in images and video : a survey. *Pattern Recognition*, 37:977–997, 2004.
- [75] Lloyd Alan FLETCHER et Rangachar KASTURI : A Robust Algorithm for Text String Separation from Mixed Text/Graphics Images. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 10(6), Novembre 1988.
- [76] Karl TOMBRE, Salvatore TABBONE, Loïc PÉLISSIER, Bart LAMIROY et Philippe DOSCH : Text/Graphics Separation Revisited. *In Workshop on Document Analysis Systems (DAS)*, pages 200–211. Springer-Verlag, 2002.
- [77] Liu WENYIN et Dov DORI : From Raster to Vectors : Extracting Visual Information from Line Drawings. *In Pattern Analysis and Applications*, pages 10–21, Janvier 1999.
- [78] Dov DORI et Wenyin LIEU : Sparse Pixel Vectorization : An Algorithm and Its Performance Evaluation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 31(3):202–215, 1999.
- [79] Jiqiang SONG, Feng SU, Jibing CHEN, Chiewlan TAI et Shijie CAI : Line net global vectorization : an algorithm and its performance evaluation. *In Computer Vision and Pattern Recognition, 2000. Proceedings. IEEE Conference on*, volume 1, pages 383–388, 2000.
- [80] Feng SU, Jiqiang SONG et Shijie CAI : A vectorization system for architecture engineering drawings. *In Wenyin LIU et Josep LLADÓS, éditeurs : Graphics Recognition. Ten Years Review and Future Perspectives*, Lecture Notes in Computer Science, pages 11–22. Springer Berlin Heidelberg, 2006.
- [81] Christine ALVARADO et Randall DAVIS : SketchREAD : a Multi-Domain Sketch Recognition Engine. *In Proceeding UIST '04 Proceedings of the 17th annual ACM symposium on User interface software and technology*, volume 6, pages 23–32, 2004.
- [82] Christian AH-SOON et Karl TOMBRE : Architectural symbol recognition using a network of constraints. *Pattern Recognition Letters*, 22:231–248, 2001.
- [83] Siu-hang OR, Kin-Hong WONG, Ying-kin YU et Michael Ming-yuan CHANG : Highly Automatic Approach to Architectural Floorplan Image Understanding and Model Generation. *In Proc. Vision, Modeling, and Visualization, IOS Press*, pages 25–32, 2005.

- [84] Josep LLADOS, Ernest VALVENY, Gemma SANCHEZ et Enric MARTI : Symbol Recognition : Current Advances and Perspectives. *In Graphics Recognition Algorithms and Applications, 4th International Workshop, GREC 2001*, pages 104–128. 2002.
- [85] Gemma SANCHEZ, Ernest VALVENY, Josep LLADOS, Joan MAS et Narcis LOZANO : A Platform to Extract Knowledge from Graphic Documents. Application to an Architectural Sketch Understanding Scenario. *In 6th International Workshop, DAS 2004*, pages 389–400, Florence, Italie, Septembre 2004.
- [86] Tong LU, Huafei YANG, Ruoyu YANG et Shijie CAI : Automatic analysis and integration of architectural drawings. *International Journal on Document Analysis and Recognition (IJDAR)*, 9:31–47, 2007.
- [87] Tiantian GUO, Hui ZHANG et Yamei WEN : An improved example-driven symbol recognition approach in engineering drawings. *Computers and Graphics*, 36:835–845, 2012.
- [88] Ernest VALVENY et Enric MARTI : Application of Deformable Template Matching to Symbol Recognition in Hand-written Architectural Drawings. *In Document Analysis and Recognition, ICDAR '99. Proceedings of the Fifth International Conference on*, pages 483–486, Espagne, 1999.
- [89] Charles EASTMAN, Jae-min LEE, Yeon-suk JEONG et Jin-kook LEE : Automatic rule-based checking of building designs. *Automation in Construction*, 18:1011–1033, 2009.
- [90] Guillermo ARANDA-MENA et Ron WAKEFIELD : Interoperability of building information : myth or reality? *In eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction*, pages 127–133, 2006.
- [91] David GREENWOOD, Stephen LOCKLEY, Sagar MALSANE et Jane MATTHEWS : Automated compliance checking using building information models. *In The Construction, Building and Real Estate Research Conference of the Royal Institution of Chartered Surveyors, RICS*, London, 2010.
- [92] Remco A. NIEMEIJER, Bauk de VRIES et Jakob BEETZ : Check-mate : automatic constraint checking of IFC models. *In A. Dikbas, E. Ergen, H. Giritli (Eds.), Managing IT in Construction/Managing Construction for Tomorrow, CRC Press*, 2009.
- [93] André BORRMANN, Juha HYVÄRINEN et Ernest RANK : Spatial constraints in collaborative design processes. *In Proceedings of the International Conference on Intelligent Computing in Engineering (ICI'09)*, Berlin, Allemagne, 2009.
- [94] Q.Z YANG et Xingjan XU : Design knowledge modeling and software implementation for building code compliance checking. *Building and environment*, 39:689–698, 2004.
- [95] Sébastien HORNA, Daniel MENEVEAUX, Guillaume DAMIAND et Yves BERTRAND : Consistency constraints and 3D building reconstruction. *Computer-Aided Design*, 41:13–27, 2009.
- [96] Giovanni CASELLA, Vincenzo DEUFEMIA, Viviana MASCARDI, Maurizio MARTELLI et Genoveffa TORTORA : Reasoning about Hand-Drawn Sketches : An Approach Based on Intelligent Software Agents. *In Visual Information Systems. Web-Based Visual Information Search and Management, 10th International Conference, VISUAL*, pages 302–314, Salerno, Italie, 2008.

- [97] Jia QI, R.R.A ISSA et S. OLBINA : Integration of Safety In Design Through The Use Of Building Information Modeling. *Computing in Civil Engineering*, pages 698–705, 2011.
- [98] Sijie ZHANG, Jochen TEIZE, Jin-Kook LEE, Charles M. EASTMAN et Manu VENGOPAL : Building Information Modeling (BIM) and Safety : Automatic Safety Checking of Construction Models and Schedules. *Automation in Construction*, 29:183–195, 2013.
- [99] Sijie ZHANG, Kristiina SULANKIVI, Markku KIVINIEMI, Ilkka ROMO, Charles M. EASTMAN et Jochen TEIZER : Bim-based fall hazard identification and prevention in construction safety planning. *Safety Science*, 72:31 – 45, 2015.
- [100] Anastasiya YURCHYSHYNA, Catherine FARON-ZUCKER, Nhan LE THANH et Alain ZARLI : Towards the Knowledge Capitalisation and Organisation in the Model of Conformity-Checking Process in Construction. *In Knowledge-Based Intelligent Information and Engineering Systems, 12th International Conference, KES 2008, Proceedings, Part I*, pages 341–348, Zagreb, Croatie, 2008.
- [101] Lan DING, Robin DROGEMULLER, Mike ROSENMAN, David MARCHANT et John GERO : Automating code checking for building designs - DesignCheck. *In Clients Driving Innovation : Moving Ideas into Practice. CRC for Construction Innovation.*, pages 1–16, 2006.
- [102] Eilif HJELSETH et Nick NISBET : Exploring semantic based model checking. *In Proceedings of the CIB W78 2010 : 27th International Conference*, Caire, Egypte, 2010.
- [103] Tong LU, Chiew-Lan TAI, Li BAO, Feng SU et Shijie CAI : 3D Reconstruction of Detailed Buildings from Architectural Drawings. *Computer-Aided Design and Applications*, 2(1-4):527–536, 2005.
- [104] Tong LU, Chiew-Lan TAI, Feng SU et Shijie CAI : A new recognition model for electronic architectural drawings. *Computer-Aided Design*, 37:1053–1069, 2005.
- [105] Mohammad AWRANGJEB, Chunsun ZHANG et Clive S. FRASER : Automatic extraction of building roofs using LIDAR data and multispectral imagery. *ISPR Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 83:1–18, 2013.
- [106] Vishal SINGH, Ning GU et Xiangyu WANG : A theoretical framework of a BIM-based multi-disciplinary collaboration platform. *Automation in Construction*, 20(2):134 – 144, 2011.
- [107] Muhammad Tarik SHAFIQ, Jane MATTHEWS et Stephen R. LOCKLEY : A study of BIM collaboration requirements and available features in existing model collaboration systems. *Journal of Information Technology in Construction*, 18:148–161, 2013.
- [108] Christophe CRUZ et Christophe NICOLLE : Active3D : Vector of collaboration, between sharing and data exchange. *Journal of Computer Science*, 5(3):1–8, 2006.
- [109] Markus WEBER, Christoph LANGENHAN, Thomas ROTH-BERGHOFER, Marcus LIWICKI, Andreas DENGEL et Frank PETZOLD : a.SCatch : Semantic Structure for Architectural Floor Plan Retrieval. *In 18th International Conference on Case-Based Reasoning, ICCBR 2010*, Alessandria, Italie, Juillet 19-22 2010.
- [110] Taejung KIM et Jan-Peter MULLER : Development of a graph-based approach for building detection. *Image and Vision Computing*, 17:3–14, 1999.

- [111] G.S ZHI, S.M LO et Z. FANG : A graph-based algorithm for extracting units and loops from architectural floor plans for a building evacuation model. *Computer-Aided Design*, 35:1–14, 2003.
- [112] Paul MERRELL, Eric SCHKUFZA et Vladlen KOLTUN : Computer-generated Residential Building Layouts. *In ACM SIGGRAPH Asia 2010 Papers*, pages 181 :1–181 :12, 2010.
- [113] Christophe LANGENHAN et Frank PETZOLD : The fingerprint of architecture : sketch-based design methods for researching building layouts through the semantic fingerprinting of floor plans. *International electronic scientific-educational journal : Architecture and Modern Information Technologies*, 4(13), 2010.
- [114] Robert J. HITCHCOCK et Justin WONG : Transforming IFC architectural views BIMS for energy simulation. *In Proceedings of Building Simulation*, pages 1089–1095, Sydney, Novembre 2011.
- [115] Sheraz AHMED, Markus WEBER, Marcus LIWICKI, Christoph LANGENHAN, Andreas DENGEL et Frank PETZOLD : Automatic Analysis and Sketch-Based Retrieval of Architectural Floor Plans. *Pattern Recognition Letters*, 2013.
- [116] Henri MAITRE : Un panorama de la transformée de hough. *Traitement du signal*, 2:305–317, 1985.
- [117] Lluís-Pere de las HERAS, Joan MAS, Gemma SANCHEZ et Ernest VALVENY : Well Patch-Based Segmentation in Architectural Floorplans. *In International Conference on Document Analysis and Recognition*, pages 1270–1274, 2011.
- [118] Xavier HILAIRE et Karl TOMBRE : Robust and Accurate Vectorization of Line Drawings. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 28(6), 2006.
- [119] Satoshi SUZUKI et Keiichi ABE : Topological structural analysis of digitized binary images by border following. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 30(1):32 – 46, 1985.
- [120] Josep LLADÓS, Jaime LÓPEZ-KRAHE et Enric MARTÍ : A system to understand hand-drawn floor plans using subgraph isomorphism and Hough transform. *Mach. Vision Appl.*, 10(3):150–158, 1997.

Valorisations liées aux travaux

Chapitres et Articles de journaux

1. L. Gimenez, S. Robert, F. Suard, K. Zreik. Elaboration de maquettes BIM à partir de plans 2D scannés. O. Celnik, E. Lebègue, eds. In *BIM et maquette numérique pour l'architecture, le bâtiment et la construction*, Eyrolles, CSTB (2014).
2. L. Gimenez, J.L. Hippolyte, S. Robert, F. Suard, K. Zreik, Review : reconstruction of 3D Building Information Models from 2D scanned plans. *Journal of Building Engineering*, 2(0), pp. 24 – 35, 2015.
3. L. Gimenez, S. Robert, F. Suard, K. Zreik, Automatic reconstruction of 3D building models from 2D scanned plans. *Automation in Construction*, *En correction*.

Actes de conférences internationales

1. L. Gimenez, S. Robert, F. Suard, K. Zreik, Reconstruction of 3D building models from 2D scanned plans-opening the path for enhanced decision support in renovation design, *ECPPM 2014*, Vienne, Autriche, Septembre 2014.
2. L. Gimenez, S. Robert, F. Suard, K. Zreik, A novel approach to 2D drawings-based reconstruction of 3D building digital models, *International Conference on Building Information Modelling (BIM) in Design, Construction and Operations*, Bristol, Uk, Septembre 2015.
3. L. Gimenez, S. Robert, F. Suard, K. Zreik, Cost-effective reconstruction of BIM from 2D scanned plan : experiments on existing buildings, *Sustainable Places 2015*, Savona, Italie, Septembre 2015.